

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Optimalizace řízení Peltierova článku v oblasti nízkých teplot

Optimization of Peltier Cell Control in Low Temperature Field

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Vojtěch Šotola

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T003 Aplikovaná elektronika

Téma:

Optimalizace řízení Peltierova článku v oblasti nízkých teplot
Optimization of Peltier Cell Control in Low Temperature Field

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor možností použití komerčně dostupných Peltierových článků v oblasti nízkých teplot.
2. Navrhněte a ověřte způsob měření teploty s ohledem na minimalizaci rušení z vnějších napájecích zdrojů.
3. Ověřte možnost využití PWM modulace s ohledem na časovou konstantu chlazeného zařízení.
4. Na základě pokynů vedoucího diplomové práce realizujte pokusná měřicí zapojení a proveďte jejich praktická ověření.

Seznam doporučené odborné literatury:

<https://www.meerstetter.ch/compendium/>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Sládeček, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 30. dubna 2020

.....

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

V Ostravě 30. dubna 2020


.....

Rád bych na tomto místě poděkoval Ing. Václavu Sládečkovi, Ph.D. za odpornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce. Děkuji také rodině za podporu.

Abstrakt

V práci je uvedena analýza čidel a senzorů teploty – jejich měření a srovnání. Dále je uvedena analýza Peltierových článků, především jejich převodní charakteristiky a zjištění časových konstant. Práce popisuje také možnost zapojení článků do kaskády, získání teploty $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ na studené straně, návrh regulátoru pro tuto kaskádu a ověření regulátoru založeném na 8b mikrokontroléru Atmega16.

Klíčová slova: Teplota; měření; Pt1000; termočlánek; DS18B20; TEC; Peltierův článek; kaskáda

Abstract

The analysis of temperature sensors is presented in the work – their measurement and comparison. Next analysis is of Peltier modules, especially their conversion characteristics and determination of time constants. This work describes also possibility to connect cells in a cascade (multistage TEC), obtains a temperature of $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ on the cold side, design a controller for this multistage and verification of the controller based on 8b Atmega16 microcontroller.

Keywords: Temperature; measurement; Pt1000; thermocouple; DS18B20; TEC; Peltier modul; multistage

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
Seznam výpisů zdrojového kódu	13
1 Úvod	14
2 Analýza senzorů teploty	15
2.1 Teplota	15
2.2 Čidla a senzory teploty	16
2.3 Měření časové konstanty	20
2.4 Vliv rušení	24
3 Analýza Peltierových článků	26
3.1 Peltierův článek typu TEC	26
3.2 Měření TEC článků	30
4 Analýza kaskády TEC článků a návrh regulátoru	34
4.1 Návrh regulátoru	36
5 Realizace regulátoru	39
5.1 Převodník odpor-napětí	39
5.2 Spínací tranzistor a budič	43
5.3 Ostatní pomocné obvody analogové části	44
5.4 Číslicová část	44
5.5 Program MCU	45
6 Verifikace regulátoru	51
6.1 Postup měření	51
6.2 Výsledky	52
7 Závěr	54
Použitá literatura a reference	55
A Schémata	57
B Simulační schéma	60

Seznam použitých zkratek a symbolů

Pt1000	– Platinové odporové čidlo s $R_0 = 1000\Omega$
termistor	– Rezistor citlivý na teplotu
NTC	– Termistor se záporným teplotním součinitelem odporu
PTC	– Termistor s kladným teplotním součinitelem odporu
TEC	– Peltierův článek určený pro chlazení
TEG	– Peltierův článek určený pro generování
PWM	– Pulzní-šířková modulace
CSV	– Jednoduchý a standardizovaný textový formát pro reprezentaci tabulkových dat
MCU	– Mikrokontrolér
MOS tranzistor	– Polem řízený tranzistor (MOSFET)
DC	– Stejnosměrný proud
LCD	– Displej s kapalnými krystaly
T	– Termodynamická teplota $[T] = K$
ϑ	– Celsiova teplota $[\vartheta] = ^\circ C$
t_F	– Fahrenheitova teplota $[t_F] = ^\circ F$
t_R	– Ratkinova teplota $[t_R] = ^\circ R$
ϑ	– Celsiova teplota $[\vartheta] = ^\circ C$
R_ϑ	– Elektrický odpor při teplotě ϑ $[R_\vartheta] = \Omega$
R_0	– Elektrický odpor při $0\text{ }^\circ C$ $[R_0] = \Omega$
α	– Teplotní součinitel odporu $[\alpha] = K^{-1}$
W_{100}	– Redukovaný odpor $[W_{100}] = -$
ϑ	– Celsiova teplota $[\vartheta] = ^\circ C$
E	– Termoelektrické napětí článku $[E] = V$
α_{TC}	– Termoelektrické napětí článku $[\alpha_{TC}] = \frac{V}{^\circ C}$
τ	– Časová konstanta $[\tau] = s$
Q_H	– Teplo teplé strany $[Q_H] = J$
Q_C	– Teplo studené strany $[Q_C] = J$
Q_{max}	– Maximální výkon $[Q_{max}] = W$
U_{max}	– Maximální napětí $[U_{max}] = V$
I_{max}	– Maximální proud $[I_{max}] = A$
$\Delta\vartheta_{max}$	– Maximální teplotní rozdíl $[\Delta\vartheta_{max}] = ^\circ C$
ϑ_{max}	– Maximální teplota $[\vartheta_{max}] = ^\circ C$
R_{tov}	– Elektrický odpor článku uvedený v katalogu $[R_{tov}] = \Omega$

R_m	– Elektrický odpor změřený $[R_m] = \Omega$
U	– Elektrické napětí $[U] = V$
I_{ref}	– Referenční proud $[I_{ref}] = A$
R_{min}	– Minimální elektrický odpor $[R_{min}] = \Omega$
A_U	– Napětové zesílení $[A_U] = -$
I_{set}	– Nastavený proud $[I_{set}] = A$
U_{ref}	– Referenční napětí $[U_{ref}] = V$
R_N	– Referenční elektrický odpor $[R_N] = \Omega$
e	– Regulační odchylka $[e] = ^\circ C$
T_{VZ}	– Vzorkovací perioda $[T_{VT}] = s$
$P1$	– Přenos soustavy se setrvačností 1. řádu
$P1Z$	– Přenos soustavy se setrvačností 1. řádu s nulami
$P1D$	– Přenos soustavy se setrvačností 1. řádu s dopravním zpožděním
$P2$	– Přenos soustavy se setrvačností 2. řádu
$P2Z$	– Přenos soustavy se setrvačností 2. řádu s nulami
$P2D$	– Přenos soustavy se setrvačností 2. řádu s dopravním zpožděním
$P1_{kas}$	– Přenos kaskády TEC článků
$P_{\check{id}lo}$	– Přenos měřicího členu
P_{PM}	– Přenos pulzního měniče
P_P	– Přenos proporcionálního členu
P_{PD}	– Přenos proporcionálně derivačního členu
P_{PI}	– Přenos proporcionálně integračního členu
P_{PID}	– Přenos proporcionálně integračně derivačního členu
P_C	– Přenos celé soustavy

Seznam obrázků

1	Teplotní závislost různých čidel (materiálů)	16
2	Vnitřní zapojení DS18B20 (převzato z [8])	20
3	Schéma zapojení měřicího stanoviště	20
4	Naměřená data v poměrovém tvaru	21
5	Naměřená data v normovaném tvaru	22
6	Výstup modelů ze System Identification Toolbox	24
7	Rušení způsobeno proudem 7 A protékající deseti závity kolem signálového vedení	25
8	Rušení způsobeno proudem 7 A protékající deseti závity kolem signálového vedení v poměrovém tvaru	25
9	Schématické znázornění TEC článku	26
10	Znázornění jedné buňky s vyznačenými veličinami	27
11	Ukázky vyráběných provedení TEC článků (převzato z [12])	29
12	Ukázky speciálních provedení TEC článků	29
13	Měřicí přípravek pro měření TEC článků	30
14	Zapojení měření TEC článků	31
15	Závislosti proudu a napětí na teplotním rozdílu	32
16	Normovaný tvar oteplovací charakteristiky	33
17	Sestavená kaskáda z článků	34
18	Upravený přípravek pro měření TEC článků	34
19	Charakteristiky kaskády TEC článků	35
20	Schéma regulační smyčky	36
21	Simulace nastavení regulátoru	38
22	Schéma měřicího můstku s proudovými zdroji	40
23	Schéma měřicího můstku se zesilovačem, bez kompenzačních obvodů	41
24	Schéma zapojení zdroje proudu	41
25	Schéma zapojení zdroje referenčního napětí +5,0 V	42
26	Schéma zapojení elektronického spínače	43
27	Schéma zapojení zdrojové části	44
28	Stavový diagram	45
29	Vývojový diagram inicializace	47
30	Části regulátoru	50
31	Ukázka měřicího stanoviště	51
32	Měření regulátoru	52
33	Porovnání teploměrů	52
34	Porovnání simulací	53
35	Schéma analogové části č. 1	57
36	Schéma analogové části č. 2	58

37	Schéma digitální části	59
38	Simulační schéma	60

Seznam tabulek

1	Přehled teplot	15
2	Přehled teplotních součinitelů pro jednotlivé materiály	17
3	Přehled tolerančních tříd platinových čidel	17
4	Typy termoelektrických článků a základní údaje dle IEC 584.1 (převzato z [3] str. 93)	19
5	Přehled časových konstant	24
6	Přehled parametrů jednotlivých TEC článků	33

Seznam výpisů zdrojového kódu

1	Zdrojový kód metody MAIN	45
2	Zdrojový kód metody regulace	48

1 Úvod

V první kapitole je uvedena stručná charakteristika problematiky teploty a teplotních čidel a senzorů, konkrétně jde o platinové odporové typy, termočlánky, jako jediná aktivní čidla pro měření teploty. Jako jediný zástupce integrovaných senzorů je zmíněn senzor DS18B20, založený na polovodičovém senzoru s PN přechodem. V kapitole je uvedeno i vlastní měření časové konstanty vybraných senzorů. V závěru měření časových konstant je uvedena přehledná tabulka. Poslední část kapitoly pojednává o vlivu rušení na čidla (popř. senzory).

Druhá kapitola pojednává o Peltierových článcích. Kromě fyzikálních principů je zde také uvedena jednoduchá analýza trhu, měření vybraných článků, které jsou běžně dostupné na českém trhu.

V třetí kapitole je zobrazena vytvořená kaskáda z vybraných článků. Její měření parametrů. Na základě parametrů je uvedena metodika návrhu regulátoru. V závěru jsou uvedeny výstupy ze simulací jednotlivých možností.

Poslední dvě kapitoly se zabývají realizací regulátoru a jeho ověřením. Realizace je popsána detailně. Jednotlivé významné části regulátoru jsou zdůrazněny. Princip měření teploty s využitím co největší možné citlivosti.

2 Analýza senzorů teploty

Pro jakoukoliv regulaci je nezbytné měření výstupní veličiny, je možné měřit i jiné veličiny pro komplexnější regulaci. Pro regulaci teploty je třeba reálnou teplotu měřit. Problém s teplotou je ten, že na světě se vyskytuje několik jednotek, které popisují velikost této veličiny. Proto bude prvně uveden přehled a charakteristika fyzikální veličiny teplota a následně jednotlivé statě týkající se jednotlivých druhů senzorů a jejich analýza na základě provedených měření.

2.1 Teplota

Je stavová veličina určující stav hmoty. Její velikost je závislá na kinetické energii částic látky. Teplota je ústřední pojem v termice a je klíčovou veličinou k popisu tepelných jevů. Každý člověk se v běžném životě s tímto pojmem setkal.[1]

Tabulka 1: Přehled teplot

Veličina		Jednotky
Název	Značka	
Termodynamická teplota	T, Θ	Kelvin (K)
Celsiova teplota	t, ϑ	Celsiův stupeň (°C)
Fahrenheitova teplota	t_F	Fahrenheitův stupeň (°F)
Rankinova teplota	t_R	Rankinův stupeň (°R)

Kelvin, základní jednotka termodynamické teploty, je 273,16 část termodynamické teploty trojného bodu vody. Běžně se používá Celsiova teplota, která je definována vůči termodynamické rovnici:

$$\vartheta = T - 273,15, \quad (1)$$

kde ϑ je Celsiova teplota ,
 T je termodynamická teplota.

Ze vztahu 1 plyne, že mezi teplotními rozdíly jednotlivých teplot platí následující vztah.

$$\Delta\vartheta = \Delta T \quad (2)$$

Fahrenheitova stupnice se používá především v USA. Vztah mezi Celsiovou teplotou a teplotou Fahrenheitovou je dán rovnicí:

$$t_F = \frac{9}{5}\vartheta + 32 \quad (3)$$

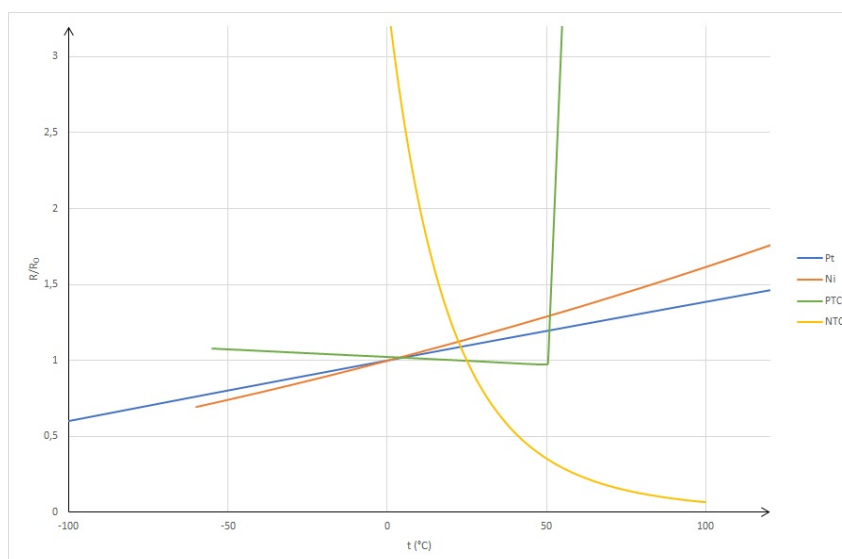
Termodynamická teplota už z definice (více [2] a [3]) nemůže být záporná, oproti tomu Celsiova teplota je kladná i záporná, stejně jako teplota Fahrenheitova. Existuje ekvivalent k termodynamické teplotě i v rámci Fahrenheitovy teploty, a to teplota Rankinova, pro kterou platí následující vztahy:

$$\Delta t_R = \Delta t_F, \quad (4)$$

$$0 \text{ K} = 0 \text{ }^\circ\text{R}. \quad (5)$$

2.2 Čidla a senzory teploty

Čidla slouží k převodu teploty na elektrickou veličinu. Ideálně napětí nebo proud, nebo nepřímo na elektrický odpor. Senzory obsahují vhodné čidlo a přídavnou elektroniku, díky které může být výstupní informace v digitální podobě. [4]



Obrázek 1: Teplotní závislost různých čidel (materiálů)

2.2.1 Odporové čidla z kovového materiálu

Elektrický odpor kovových materiálů se mění vlivem teploty. Toho se využívá pro konstrukci čidel. Mezi základní materiály patří čisté kovy (platina, nikl, měď aj.). Závislost odporu kovů není v celém rozsahu lineární. Je lineární v malém rozsahu teplot. Na příklad pro teplotní rozsah 0 °C až 100 °C lze přibližně použít následujícího vztahu 6.

$$R_{\vartheta} = R_0[1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)] \quad (6)$$

Kde R_{ϑ} je elektrický odpor při teplotě ϑ ,
 R_0 je elektrický odpor při 0 °C,
 α je teplotní součinitel odporu,
 ϑ je teplota,
 ϑ_0 je nulová teplota (tedy 0 °C).

Teplotní součinitel odporu je definovaný vztahem 7. Přehled rozmezí teplotních součinitelů odporu pro běžné materiály jsou přehledně uvedeny v tab. 2.

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0}. \quad (7)$$

Kromě teplotního součinitele se definuje poměr odporu při 100 °C ku odporu při 0 °C. Tento

Tabulka 2: Přehled teplotních součinitelů pro jednotlivé materiály

Materiál	$\frac{\alpha}{10^{-3}\text{K}^{-1}}$
Platina	3,85 – 3,91
Nikl	6,17 – 6,75
Měď	4,26 – 4,33

poměr se označuje jako tzv. redukovaný odpor a používá se pro určení čistoty odporového materiálu

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad (8)$$

Mezi nejpoužívanější patří odporová čidla z platiny. Mají velký teplotní rozsah, platina jako kov patří mezi tzv. ušlechtilé kovy, z toho vyplývá časová stálost a netečnost k chemickým látkám. Nejběžnějším typem je Pt100, kde Pt znamená platinu a 100 je hodnota odporu při 0 °C. Ještě se vyrábějí platinová čidla v provedení Pt50, Pt200, Pt500, Pt1000 a Pt2000. Kromě toho se u čidel definují toleranční třídy, které jsou uvedeny v tab. 3.

Tabulka 3: Přehled tolerančních tříd platinových čidel

Označení třídy	teplotní tolerance $\Delta\vartheta$	Teplotnírozsah
1/10 B	$\pm(0,03 + 0,0005 \vartheta)$	0 °C až 100 °C
1/3 B (AA)	$\pm(0,10 + 0,0017 \vartheta)$	-50 °C až 250 °C
A	$\pm(0,15 + 0,002 \vartheta)$	-50 °C až 650 °C
B	$\pm(0,3 + 0,005 \vartheta)$	-200 °C až 850 °C
C	$\pm(0,6 + 0,01 \vartheta)$	-200 °C až 850 °C

Pro teplotní rozsah od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ platí teplotní závislost vyjádřena vztahem 9.

$$R_{\vartheta} = R_0 \left[1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3 (\vartheta - 100) \right] \quad (9)$$

Kde norma IEC-751¹ definuje:

$$W_{100} = 1,385 ,$$

$$R_0 = 100\ \Omega ,$$

$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1} ,$$

$$B = 5,802 \cdot 10^{-7}\ \text{K}^{-2} ,$$

$$C = 0\ \text{K}^{-3}\ \text{pro } \vartheta < 0\text{ }^{\circ}\text{C} ,$$

$$C = -4,27350 \cdot 10^{-12}\ \text{K}^{-3}\ \text{pro } \vartheta > 0\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Více informací je uvedeno v [5] nebo [3].

2.2.2 Polovodičové odporové senzory

Podobně jako u kovových teplotních senzorů využívají teplotní závislost odporu. Polovodičové odporové senzory teploty se označují jako termistory². Rozlišují se dva druhy. Jeden se označuje jako pozistor (neboli PTC³ termistor) a druhý se označuje jako negastor (neboli NTC⁴ termistor). Výhodami termistorů jsou velká teplotní citlivost, malé rozměry. Nevýhodou je nelineární charakteristika. Porovnání bylo již zobrazeno na obr. 1. Rozdíl od kovových odporových čidel je ve vztažné teplotě. U kovových čidel je základní odpor udáván při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, naopak u NTC a PTC termistorů je základní odpor udáván při $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. [3]

2.2.3 Termoelektrické články

Termoelektrické články pro měření teploty pracují na principu Seebeckův jev (více v [6]), jedná se o spojení dvou různých, většinou kovových, materiálů. Jednotlivé páry termoelektrických materiálů jsou normalizovány, přehled je uveden v tab. 4. Termoelektrické napětí je přibližně dáno vztahem:

$$E = (\alpha_1 - \alpha_2) (\vartheta_M - \vartheta_S) + \frac{\beta_1 - \beta_2}{2} (\vartheta_M - \vartheta_S)^2 , \quad (10)$$

kde E je termoelektrické napětí článku,

ϑ_M je teplota měřicího spoje,

ϑ_S je teplota srovnávacího spoje (vztažná teplota),

α, β jsou experimentálně zjištěné konstanty jednotlivých kovů.

¹ČSN EN 60751

²thermally sensitive resistor

³Positive Temperature Coefficient

⁴Negative Temperature Coefficient

Ze vztahu 10 je zřejmé, že článkem měříme teplotní rozdíl mezi měřeným spojem a srovnávacím spojem. Proto je také nutné udržovat konstantní teplotu srovnávacího spoje, toho lze dosáhnout například termostatem. Pokud se teplota srovnávacího spoje bude kolísat vznikne chyba metody. Lze kompenzovat i pomocí tzv. kompenzačních krabic, které vytvářejí patřičné napětí, aby se vyrušily změny okolní teploty. Měřicí voltmetr musí mít vysokou citlivost a vysoký vstupní odpor – digitální multimetry, stejnosměrné kompenzátory. [7]

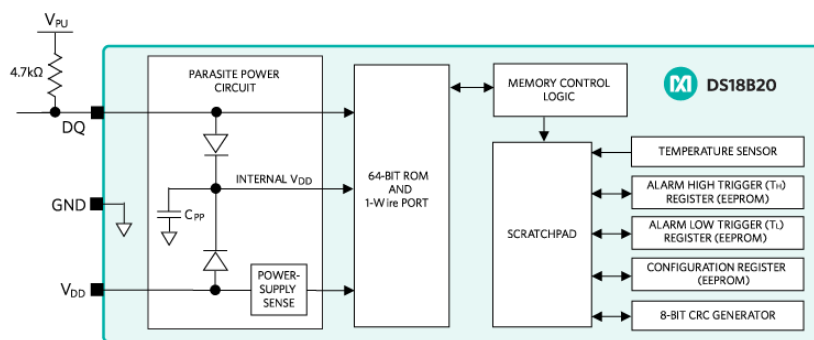
Tabulka 4: Typy termoelektrických článků a základní údaje dle IEC 584.1 (převzato z [3] str. 93)

Kód	Složení	Teplotní rozsah (°C)		α_{TC} ($\mu V/^{\circ}C$)		
		dlouhodobě	krátkodobě	100 °C	500 °C	1000 °C
K	NiCr (+)	0 až +1100	-180 až +1350	42	43	39
	NiAl(-)					
T	Cu (+)	-185 až +300	-250 až +400	46	-	-
	CuNi (-)					
J	Fe (+)	+20 až +700	-180 až +750	54	56	59
	CuNi (-)					
N	NiCrSi (+)	0 až +1100	-270 až +1300	30	38	39
	NiSiMg (-)					
E	NiCr (+)	0 až +800	-40 až 900	68	81	-
	CuNi (-)					
R	PtRh13 (+)	0 až +1600	-50 až +1700	8	10	13
	Pt (-)					
S	PtRh10 (+)	0 až +1550	-50 až +1750	8	9	11
	Pt (-)					
B	PtRh30 (+)	+100 až +1000	+100 až +1820	1	5	9
	PtRh (-)					
G (W)	W (+)	+20 až +2320	0 až +2600	5	16	21
	WRh (-)					
C (W5)	WRh5 (+)	+50 až +1820	+20 až +2300	15	18	18
	WRh26 (-)					

2.2.4 Integrovaná čidla s přídatnou elektronikou – DS18B20

Na trhu jsou k dostání čidla s přídatnou elektronikou, která převádí signál z čidla, upravuje jej, může obsahovat i komunikační rozhraní. Dnes jsou tyto obvody plně integrovány, nejoblíbenějším zástupcem je DS18B20. Jeho vnitřní struktura je na obr. 2, je patrné, že obsahuje teplotní senzor, řídicí elektroniku a komunikační rozhraní pro OneWire sběrnici od firmy *Dallas Semiconductor*⁵.

⁵Dnes součást Maxim Integrated

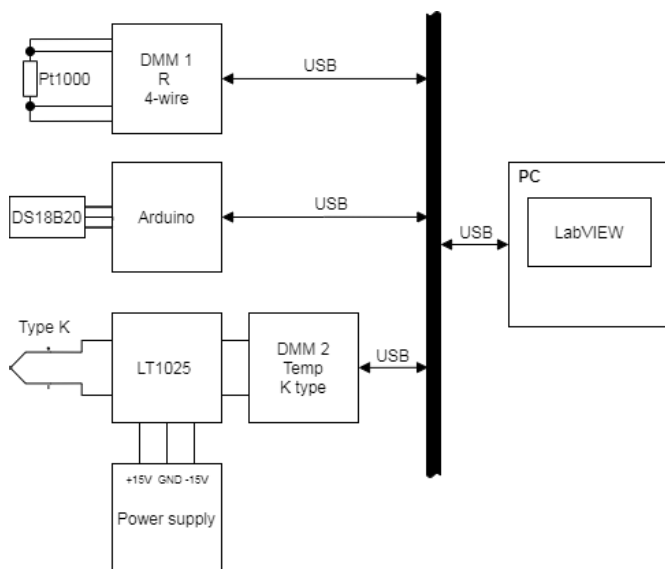


Obrázek 2: Vnitřní zapojení DS18B20 (převzato z [8])

2.3 Měření časové konstanty

Pro regulaci je velmi důležitá odezva měřícího členu, protože každý prvek má svou setrvačnost. Výstupní veličina nikdy nemůže okamžitě odpovídat reálnému stavu, jinými slovy je zde zpoždění. Cílem je toto zpoždění změřit pro jednotlivé čidla a porovnat je. Měřená čidla:

- Pt1000 – třída A, CRZ 2005;
- Termočlánek typu K – UNI-T UT-T02;
- DS18B20 – TO92;
- DS18B20 – vodotěsné pouzdro.



Obrázek 3: Schéma zapojení měřícího stanoviště

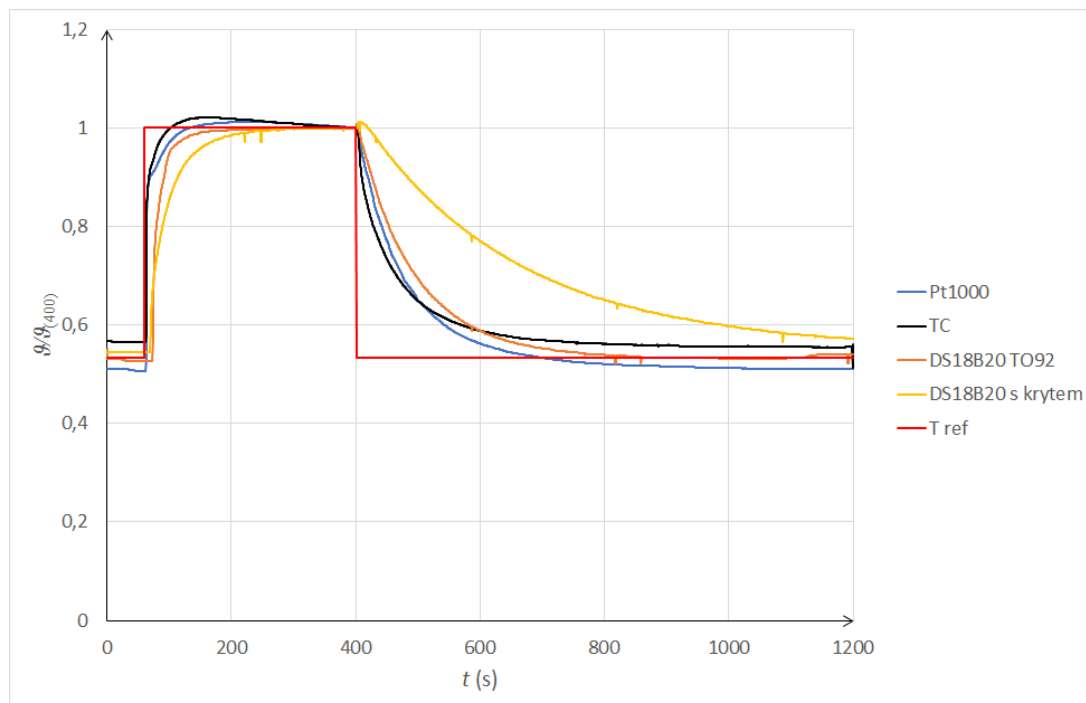
2.3.1 Popis měření

K měření časové odezvy senzorů je využito kádinky s transformátorovým olejem, který je vyhříván výkonovým rezistorem. Teplota lázně je kontrolována vztažným termočlánkem s vlastním převodníkem – srovnávací teploměr. Protože výkon odporu není regulovaný, je pouze nastaven, je nutné vyčkat, než dojde k ustálenému stavu – teplota je konstantní. V tuto chvíli začíná měření jednotlivých senzorů.

Spuštěním aplikace, která je vytvořena v prostředí LabVIEW, a nastavením nutných položek (adresy přístrojů, cesta k uložení aj.) se spustí měření. V první fázi se nastaví jednotlivé digitální multimetry. Provede se 20 měření okolní teploty a vypočte se průměr, protože jednotlivé senzory mají vůči sobě určitou odchylku. Poté uživatel zadá teplotu lázně. Po jedné minutě od vypočtení průměru je obsluha vyzvána k ponoření senzorů do lázně. Po definovaném čase 400 s je obsluha vyzvána k vytažení senzorů z lázně. Celý proces měření je ukončen po 1200 s.

Na obr. 3 je znázorněno zapojení měřicího místa. Jsou využity dva multimetry *Siglent* SDM 3055. Jeden je nastaven na měření odporu metodou čtyř vodičů pro měření Pt1000, druhý je nastaven na měření teploty pomocí termočlánku, konkrétně termočlánku typu K. Protože multimetr předpokládá vztažnou teplotu srovnávacího spoje 0 °C, je třeba provést kompenzaci pomocí integrovaného obvodu LT1025 (*Analog devices*), který je napájen ze symetrického zdroje napětí ± 15 V.

2.3.2 Vyhodnocení



Obrázek 4: Naměřená data v poměrovém tvaru

Na obrázku 4 jsou zachycena data v poměru daném vztahem 11.

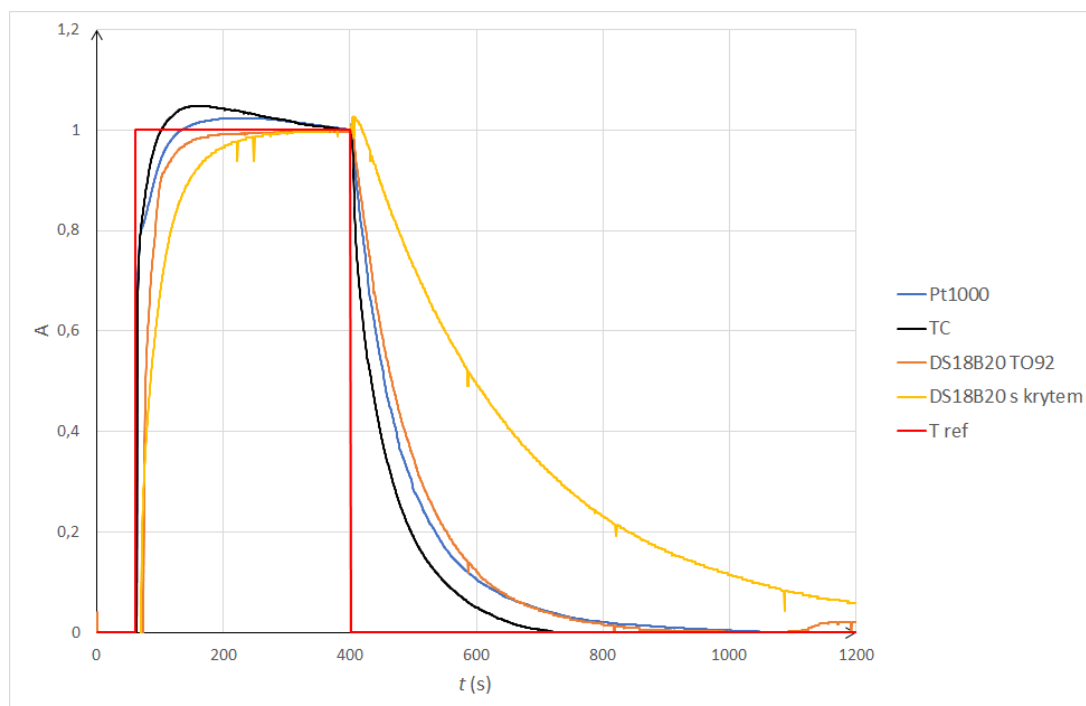
$$\frac{\vartheta}{\vartheta_{400}} = \frac{\vartheta(t)}{\vartheta(400)} \quad (11)$$

Kde $\frac{\vartheta}{\vartheta_{400}}$ je poměrový tvar,
 $\vartheta(t)$ je teplota v čase t ,
 $\vartheta(400)$ je teplota v čase $t = 400$ s.

Z grafů na obrázku 4 je patrné, že se hodnoty pohybují od cca 50 % až 100 %. Pro analýzu je třeba data upravit do normovaného tvaru. K tomu lze použít následující vztah (12).

$$A = \frac{\vartheta(t) - \vartheta(0)}{\vartheta(400) - \vartheta(0)} \quad (12)$$

Kde A je normovaný tvar,
 $\vartheta(t)$ je teplota v čase t ,
 $\vartheta(0)$ je počáteční teplota (tj. teplota v čase $t = 0$ s),
 $\vartheta(400)$ je teplota v čase $t = 400$ s.



Obrázek 5: Naměřená data v normovaném tvaru

Za předpokladu, že přenos bude podobný systému se setrvačností prvního řádu, který je popsán rovnicí 13, lze přenos v časové oblasti popsat pomocí dvou rovnic. Pro oteplení platí rovnice 14 a pro ochlazování platí rovnice 15. Při čase $t = \tau$ je na výstupu cca 63 % $\left(\frac{\vartheta_{out}}{\vartheta_{stab}} = 1 - e^{-1}\right)$ pro oteplení a pro ochlazení 37 % $\left(\frac{\vartheta_{out}}{\vartheta_{stab}} = e^{-1}\right)$, tyto hodnoty jsou zobrazeny v tab. 5.

$$K = \frac{K_p}{1 + \tau p} \quad (13)$$

$$\vartheta_{out} = \vartheta_{stab} \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad (14)$$

$$\vartheta_{out} = \vartheta_{stab} e^{-t/\tau} \quad (15)$$

Dále k určení přenosu bylo použito programu MATLAB s System Identification toolboxem. Pomocí, kterého byla provedena identifikace a vytvoření přenosové funkce. Opět časové konstanty jednotlivých modelů senzorů jsou uvedeny v tab. 5. Bylo použito několik přenosových modelů popsaných rovnicemi 16 až 21.

$$P1 = \frac{K_P}{1 + \tau p} \quad (16)$$

$$P1Z = K_P \frac{1 + \tau_Z p}{1 + \tau p} \quad (17)$$

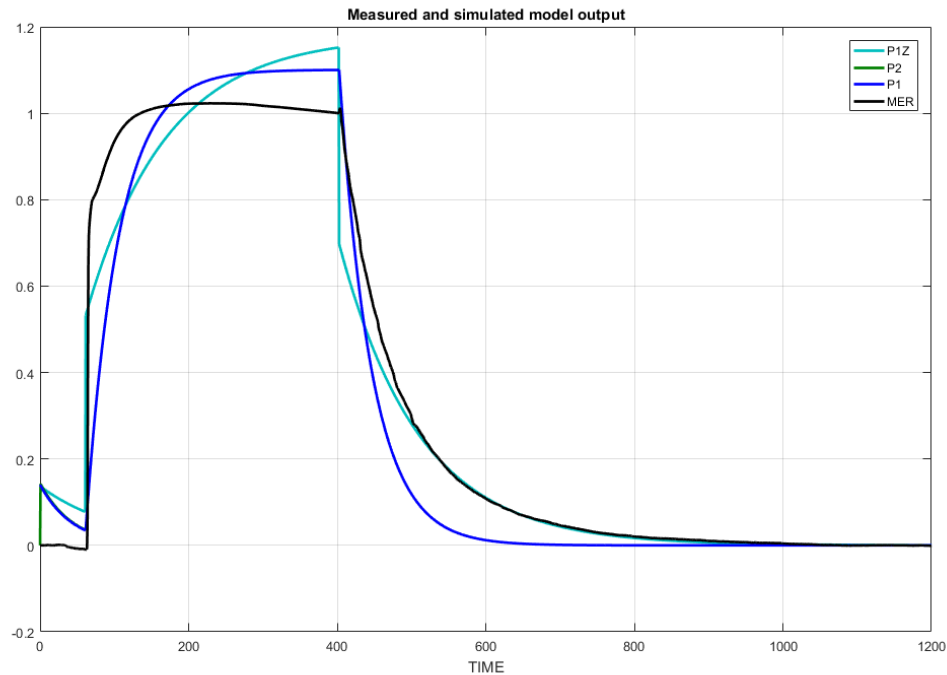
$$P1D = \frac{K_P}{1 + \tau p} e^{-\tau_D p} \quad (18)$$

$$P2 = \frac{K_P}{(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p)} \quad (19)$$

$$P2Z = K_P \frac{1 + \tau_Z p}{(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p)} \quad (20)$$

$$P2D = \frac{K_P}{(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p)} e^{-\tau_D p} \quad (21)$$

Na obr. 6 je ukázka výstupu z toolboxu pro jednotlivé modely pro platinové čidlo Pt1000. Na obrázku jsou zobrazeny přenosy podle rovnice 17, 19 a 16 a poté data změřená. Toolbox dokonce vypočte přesnost modelu, u modelu P1 z obr. 6 je shoda 74,63 %, u modelu P2 je shoda 74,64 % a pro model P1Z je to 80,36 %. Z obr. 6 je patrné, že lze použít model se setrvačností prvního řádu.



Obrázek 6: Výstup modelů ze System Identification Toolbox

Z tab. 5 je patrné, že rozdíl mezi časovou konstantou vytvořenou interpolací teplotní konstanty při ohřevu a při ochlazování, se příliš neliší od konstanty získané prostřednictvím programu MATLAB.

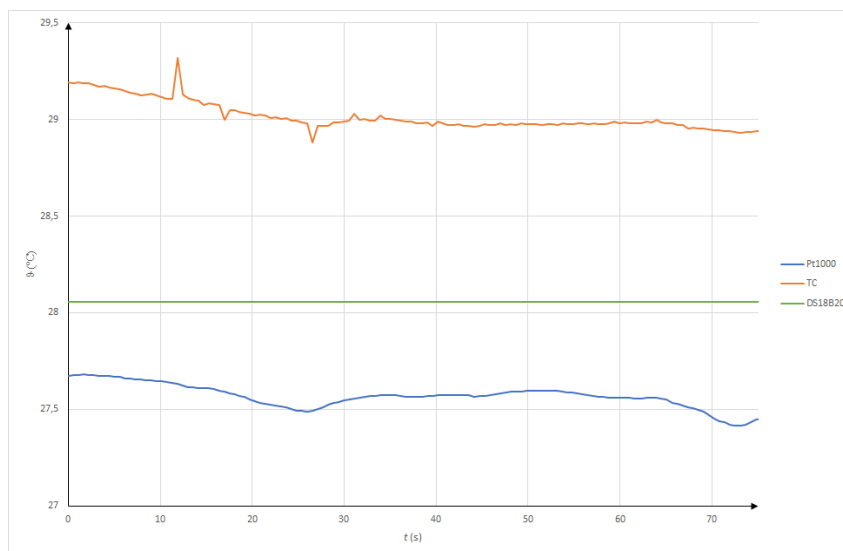
Tabulka 5: Přehled časových konstant

Senzor	τ (s)		Model	
	Oteplení	Ochlazení	Průměr	MATLAB
Pt1000	4,444	78,443	41,444	43,723
TC	4,506	53,305	28,905	25,674
DS18B20 TO92	22,020	94,820	58,420	60,459
DS18B20 s krytem	35,504	277,504	156,504	170,44

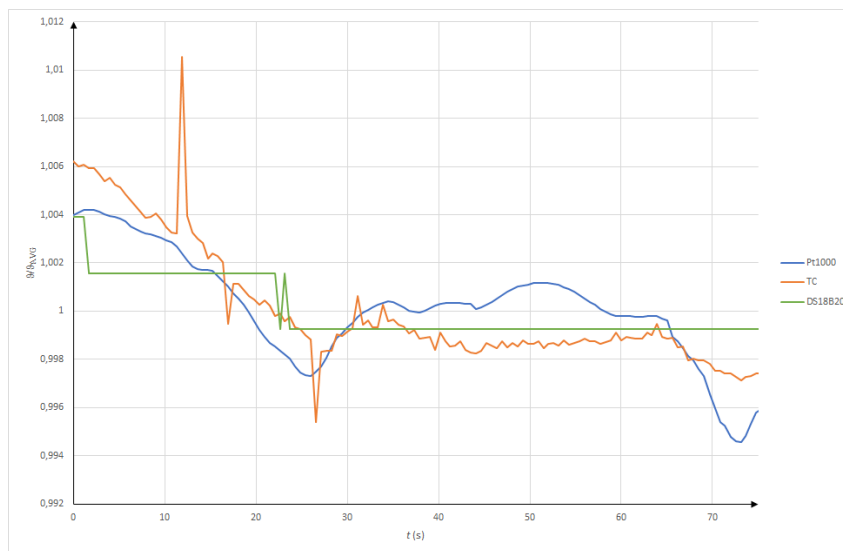
2.4 Vliv rušení

V průmyslu je velmi důležitá určitá šumová imunita. Pokud by se k užitečné informaci přidal i šum, došlo by k znehodnocení informace. Každá informace se dá zarušit, ale někdy je třeba velká úroveň rušení, pak informace má velkou imunitu. Pokud naopak stačí malá úroveň je takový signál nepoužitelný v průmyslu. Proto bylo třeba provést měření. V blízkosti vedení bylo umístěno několik běžných zdrojů rušení. Jako první byla použita trafopájka, která vytváří rušení při sepnutí a vypnutí. Nominální příkon byl 80 VA. Rušení se na měřených datech neprojevovalo.

Jako další zdroj rušení byl použit motor vrtačky, opět bez vlivu na výsledek. Dále kolem vedení byl asi desetkrát obtočen vodič, který vedl k zátěži. Tímto vodičem v aktivním režimu teče proud kolem 7 A. Tedy pokus spočíval v zapnutí a vypnutí napájecího zdroje. Tento pokus přinesl prokazatelné ovlivnění dat viz obr. 7. Vliv na jednotlivé senzory je pěkně viditelný v poměrovém tvaru (obr 8).



Obrázek 7: Rušení způsobeno proudem 7 A protékající deseti závity kolem signálového vedení



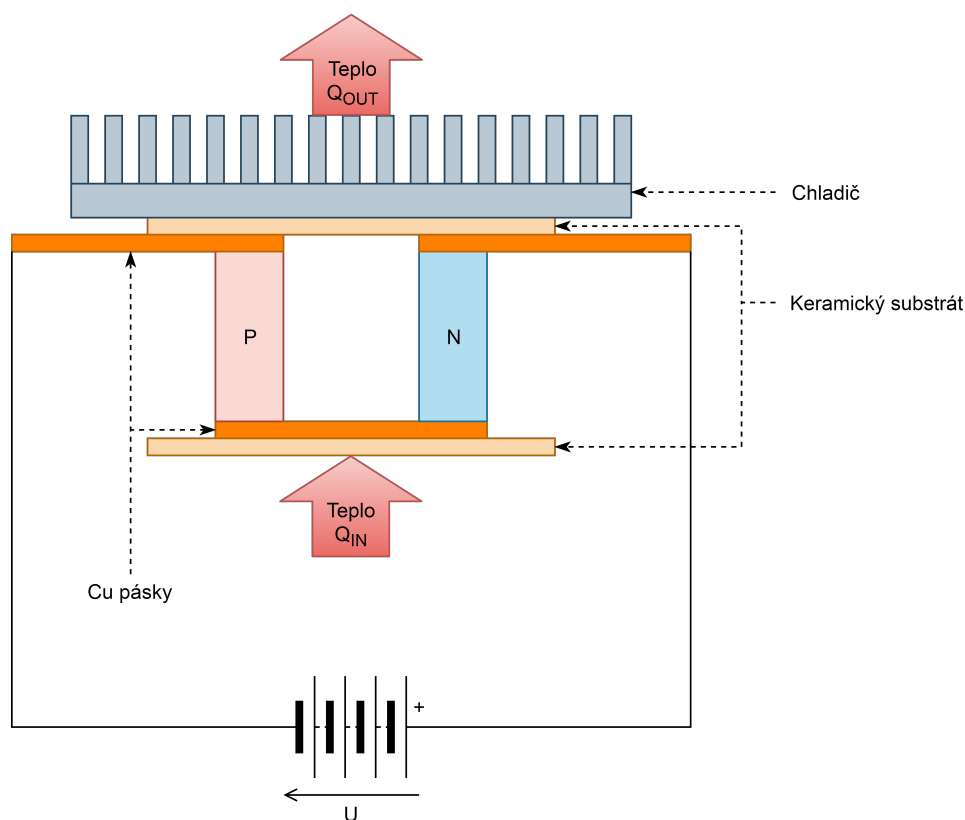
Obrázek 8: Rušení způsobeno proudem 7 A protékající deseti závity kolem signálového vedení v poměrovém tvaru

3 Analýza Peltierových článků

Peltierovy články jsou speciálním druhem termoelektrických článků. Oproti klasickým termoelektrickým článkům obsahují polovodič. Lze se setkat s tzv. TEC⁶ a TEG⁷ články. TEG články slouží k přeměně tepelné energie na energii elektrickou – využívají Seebeckův jev (více v [6]). TEC články fungují na opačném principu (Peltierův jev). Fungují jako tepelné čerpadlo, průchodem elektrického proudu odsávají teplo z jedné strany a dodávají jej na druhou stranu. Tím vytvoří teplotní gradient mezi jednotlivými stranami článku. Oba typy článků jsou záměnné, ale jen s nižší účinností celého procesu.

3.1 Peltierův článek typu TEC

Článek typu TEC se používá ke chlazení. Jak již bylo řečeno jedná se o tepelné čerpadlo, které pracuje na principu Peltierova jevu. Základní uspořádání jedné buňky je znázorněno na obr. 9. Na keramické podložce (tzv. substrátu) jsou umístěny střídavě polovodiče typu N a P, které jsou mezi sebou propojeny měděnými vodiči, které se označují jako můstky.[9]



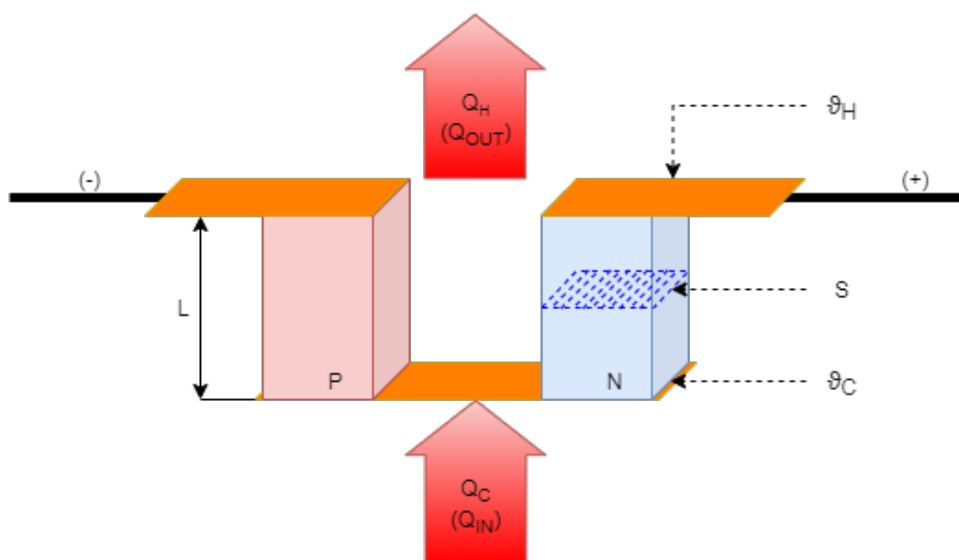
Obrázek 9: Schématické znázornění TEC článku

⁶Thermoelectric cooler

⁷Thermoelectric generator

Za předpokladu velkého zjednodušení, zanedbání určitých jevů a vlastností, lze činnost buňky popsat následovně. Ze záporného pólu zdroje se přesouvá elektron až k místu kontaktu s polovodičovou strukturou s děrovou vodivostí (typ P). Elektron má větší energii než díra, proto musí přebytek energie vyzářit v podobě tepla, pak může elektron projít do polovodiče, v polovodiči se přesouvá na druhý konec krystalu. Zde je opět kontakt s mědí, aby se elektron dostal do mědi musí přijmout energii z okolí (většinou z tepla). Pokud se mu energie dostane elektron přejde z polovodiče do mědi a přesouvá se k druhému polovodiči s elektronovou vodivostí (typ N). Elektrony v tomto polovodiči mají vyšší energii než v mědi, proto elektron musí znovu přijmout energii (opět v podobě tepla). Stejně jako předtím se v polovodiči přesouvá k druhému konci krystalu, kde elektron přestupuje do mědi. Jak bylo řečeno elektrony v mědi mají nižší energii, proto přebytečnou energii vyzáří v podobě tepla. Elektron dále pokračuje do zdroje a tím uzavírá elektrický obvod.

Jako polovodičový materiál se osvědčily tuhé roztoky $A_2^V B_3^{VI}$, převážně telluridy (vizmutu a antimonu). Materiál typu P je slitina 70 % Bi_2Te_3 a 30 % Sb_2Te_3 s aktivátory. Materiál typu N je tvořen 80 % Bi_2Te_3 a 20 % Bi_2Se_3 rovněž s vhodným aktivátorem (více v [9], [10] nebo [11]). Jednotlivé buňky lze zapojovat jak sériově, tak paralelně, tím vznikne článek, který je možné běžně koupit. Většinou se jednotlivé buňky zapojují sériově elektricky a paralelně tepelně. Výrobce většinou barevně rozlišuje přírodní vodiče, při dodržení polaritu napájecího napětí, je studená strana ta, která nese na sobě označení o typu článku. Při opačné polaritě dojde k prohození teplé a studené strany.



Obrázek 10: Znázornění jedné buňky s vyznačenými veličinami

3.1.1 Matematický model

Matematický model vychází z obr. 10. Je nutné zavést následující předpoklady:

- rozměry polodičových krystalů jsou konstantní,
- teplo vzniklé průchodem proudu polovodičem, vzniká v celém objemu krystalu,
- žádný z koeficientů není závislý na teplotě.

Po zavedení těchto zjednodušení lze TEC popsat následujícími rovnicemi:

$$Q_C = 2n \left[S_C I \vartheta_C - \frac{1}{2} R \frac{L}{S} I^2 - K \frac{S}{L} (\vartheta_H - \vartheta_C) \right], \quad (22)$$

$$U = 2n \left[S_C (\vartheta_H - \vartheta_C) + I R \frac{L}{S} \right], \quad (23)$$

kde Q_C je odebírané teplo na studené straně,

n je počet aktivních buněk,

S_C je Seebeckův koeficient,

R je elektrický odpor,

L je výška krystalu,

S je plocha základny krystalu,

I je protékaný elektrický proud,

K je tepelná vodivost,

ϑ_H je teplota teplé strany,

ϑ_C je teplota studené strany,

U je elektrické napětí.

Rovnici 22 lze rozložit na tři složky:

$S_C I \vartheta_C$ – tato část se v anglické literatuře označuje jako "*peltier cooling effect*",

$\frac{1}{2} R \frac{L}{S} I^2$ – tato část reprezentuje ztráty způsobené průchodem proudu (Joulovo teplo); koeficient $\frac{1}{2}$ má tuto hodnotu, protože se předpokládá rovnoměrné rozložení, tedy jedna polovina zahřívá studenou stranu a druhá polovina teplou stranu,

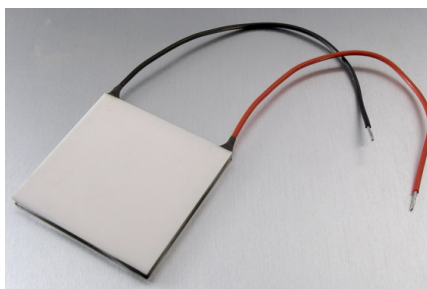
$K \frac{S}{L} (\vartheta_H - \vartheta_C)$ – reprezentuje tzv. Fourierův efekt, tedy pronikání tepla z teplé strany na studenou.

V praxi tyto vztahy poskytují pouze hrubý odhad. Protože zavedené zjednodušení jsou příliš velká. Pro přesné modelování je vhodné použít simulační prostředky výrobce článků, protože ten vytvořil model na základě přesných měření na vzorcích. [9]

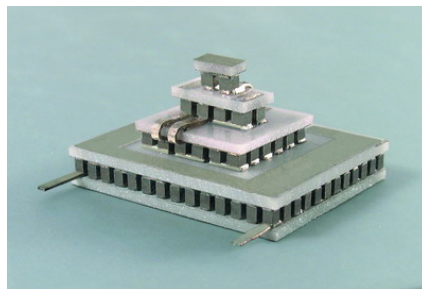
3.1.2 Analýza trhu

Na trhu je k dostání několik druhů TEC článků. Liší se chladícím výkonem, maximálním napětím, proudem, nebo maximální pracovní teplotou. Vyrábí se ve dvou základních provedení:

- jednoduché (tzv. "*Singlestage*") – obr. 11a,
- kaskádní (tzv. "*Multistage*") – obr. 11b.



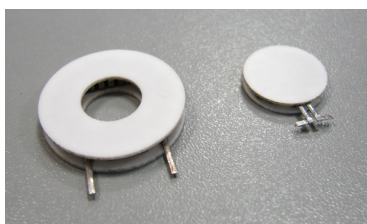
(a) Jednoduchý TEC



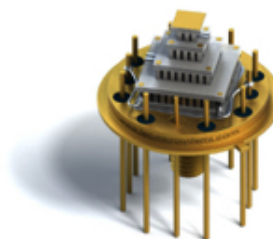
(b) Kaskádní TEC

Obrázek 11: Ukázky vyráběných provedení TEC článků (převzato z [12])

Z obr. 11 je patrné, že se nejčastěji vyrábí ve čtvercovém, popřípadě v obdélníkovém provedení. Pro speciální aplikace se vyrábí speciální tvary a rozměry (obr. 12). Protože je velmi obtížné v České republice sehnat kaskádní TEC se třemi patry. Byla dále v práci kaskáda vytvořena ze tří běžně sehnatelných TEC článků.



(a) Kruhové provedení (převzato z [12])



(b) Miniaturní provedení (převzato z [13])

Obrázek 12: Ukázky speciálních provedení TEC článků

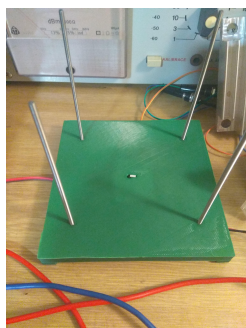
Byly zvoleny články, které ve svém prodeji nabízí *GM Electronic*. Konkrétně jsou to články **TEC1-071030**, **TEC1-12710(0)** a **HP-127100**.

3.2 Měření TEC článků

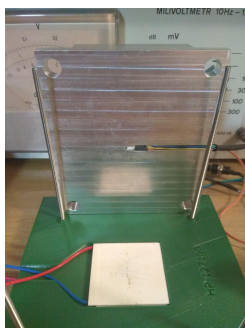
Měřením je potřeba zjistit časovou konstantu přestupu tepla mezi stranami. Dále je třeba ověřit zda lze použít napěťové řízení (např. pomocí PWM), nebo je výhodnější proudové řízení.

3.2.1 Popis měřícího přípravku

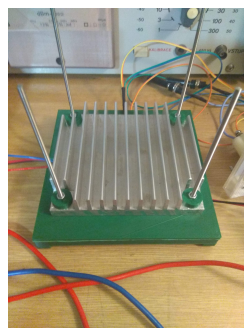
Přípravek vychází z mého původního měřícího přípravku, který jsem využil ve své bakalářské práci (viz [14]). Jedná se duralový válcovaný chladič s vyfrézovaným prostorem pro teplotní senzor Pt1000 (*CRZ2005*), ke kterému vede čtyř vodičové vedení. Oproti původnímu přípravku, je druhý chladič nahrazen dílem z ABS plastu, ve kterém je opět umístěno stejné čidlo Pt1000. Mezi tyto díly se vloží měřený TEC článek. Jednotlivé díly jsou spolu spojeny pomocí čtyř závitových tyčí M3. Vše je zobrazeno na obr. 13. Plastové díly byly vytištěny na 3D tiskárně.



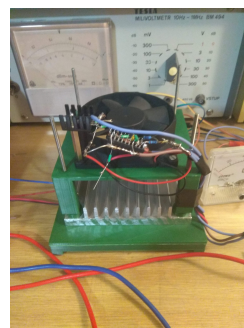
(a) Spodní díl



(b) TEC a chladič



(c) Sešroubovaný přípravek

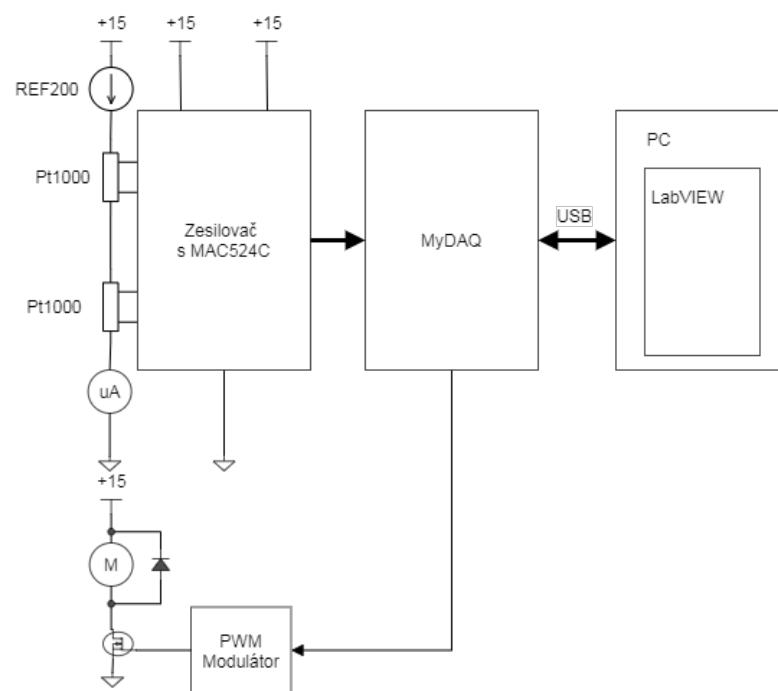


(d) Celý přípravek

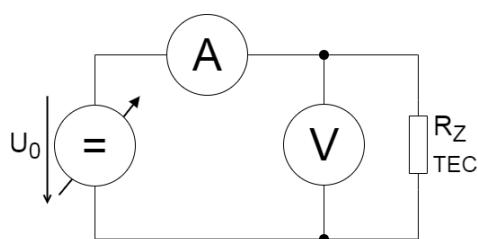
Obrázek 13: Měřící přípravek pro měření TEC článků

3.2.2 Popis měření charakteristik

Kromě měřícího přípravku je využito měřící karty *MyDAQ*, voltmetru, ampérmetru a zdroje napětí. Pro měření teploty jsou využity dvě čidla Pt1000. Aby bylo možné připojit Pt1000 k analogovému vstupu měřící karty, byl vytvořen přípravek obsahující zdroj konstantního proudu a přístrojový zesilovač, založený na obvodu MAC524C (*TESLA*). Měřící karta je obsluhována pomocí aplikace vytvořené v prostředí LabVIEW. Aplikace měří teplotu, teplotní rozdíl, čas a jednotlivá data ukládá do CSV souboru, pro následné zpracování. Postup měření je takový, že obsluha nastaví požadovaný pracovní bod TEC článku, ideálně proud. Vyčká ustálení teplotního gradientu, který je zobrazen na grafu v aplikaci (je zobrazen i filtrovaný gradient pro lepší odečítání). Obsluha v tuto chvíli odečte napětí, teplotní rozdíl. Poté nastaví nový pracovní bod. Pokud by se nastavoval pracovní bod pomocí napětí, pak obsluha odečítá proud. Kromě toho aplikace řídí otáčky ventilátoru umístěného na přípravku. Při zvýšení teploty horké strany se sepne. Jedná se o primitivní řízení se čtyřmi stupni.



(a) Zapojení přípravku

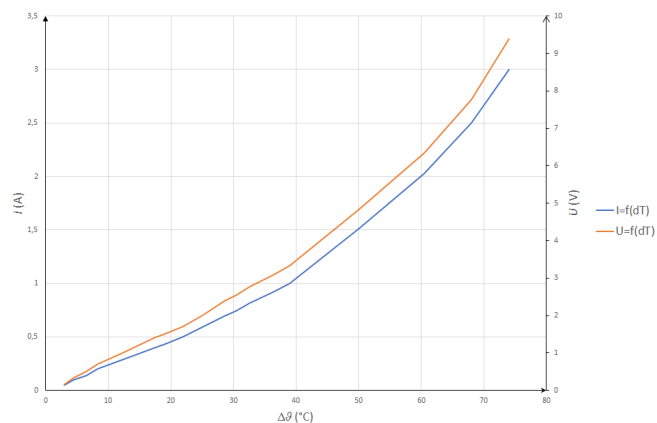


(b) Schéma zapojení

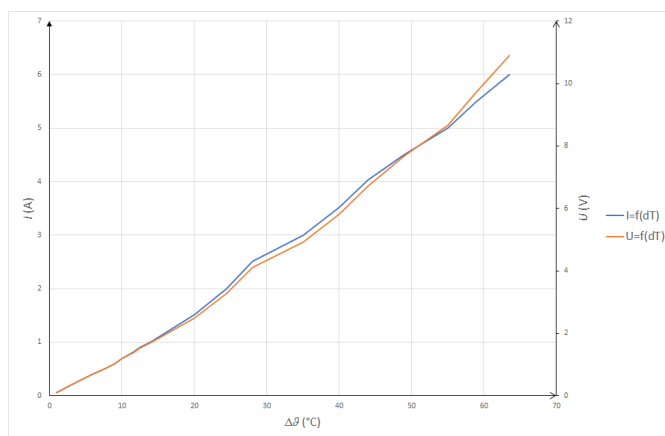
Obrázek 14: Zapojení měření TEC článků

Pro určení časové konstanty je na TEC článku nastaven takový pracovní bod, aby se dosáhlo teploty horké strany alespoň $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, poté se zdroj napětí odpojí a měří se časový průběh teplot jednotlivých teplot. Tyto data se poté opět uvedou do normového tvaru. Byla využita stejná metoda jako u termočlánků.

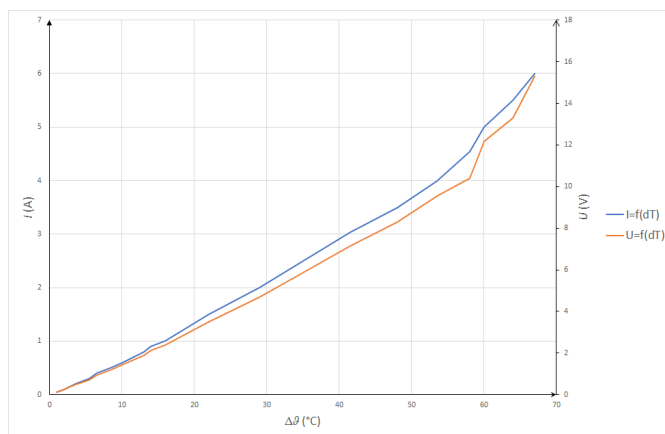
3.2.3 Výsledky měření charakteristik



(a) TEC1-071030



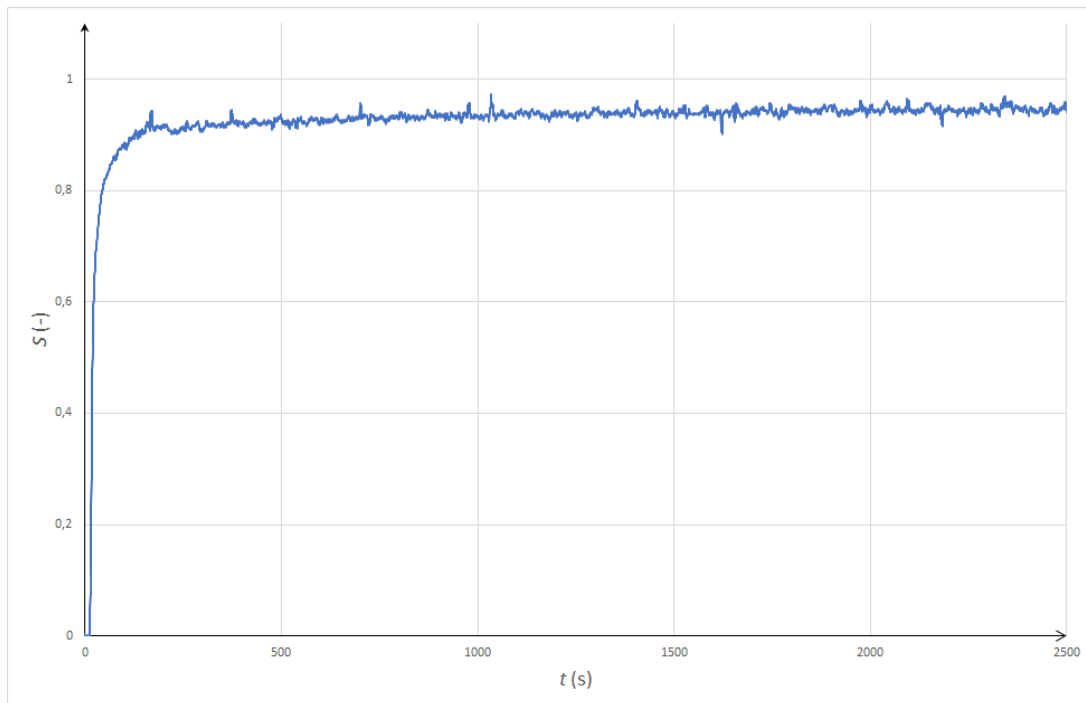
(b) TEC1-12710



(c) HP-127100

Obrázek 15: Závislosti proudu a napětí na teplotním rozdílu

Z grafů uvedených na obr. 15 je zřejmé, že není rozdíl mezi řízením napětím a proudem. Tvar funkcí je podobný. Napěťové řízení se hodí pro paralelní elektrické zapojení různých článků. Proudové pro sériové zapojení.



Obrázek 16: Normovaný tvar oteplovací charakteristiky

Z obr. 16 je patrné, že lze přenos soustavy popsat rovnicí 16. Porovnání jednotlivých článků je zobrazena v tab. 6.

Tabulka 6: Přehled parametrů jednotlivých TEC článků

Článek	Rozměry mm	Q_{max} W	U_{max} V	I_{max} A	$\Delta\vartheta_{max}$ °C	ϑ_{max} °C	R_{tov} Ω	R_m Ω	τ s
TEC1-071030	30X30	75	9,2	3	16	90	2,75	3,38	46
TEC1-12710	40X40	90	16,4	10	90	90	1,58	1,70	23,5
HP-127100	40X44	90	16,4	10	90	200	1,58	2,39	28,5

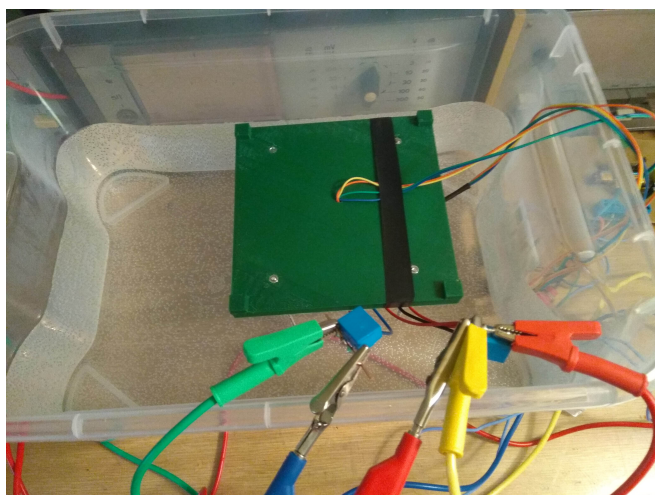
4 Analýza kaskády TEC článků a návrh regulátoru

Jako první byla sestavena kaskáda ze zmíněných TEC článků. Mezi jednotlivými články je umístěna teplovodivá pasta s vysokou tepelnou vodivostí ($1,7 \text{ W/mK}$). Pasta je nanесena tak, aby se snížila drsnost materiálu (ve velmi tenké vrstvě). Sestavená dekáda je zobrazena na obr. 17.

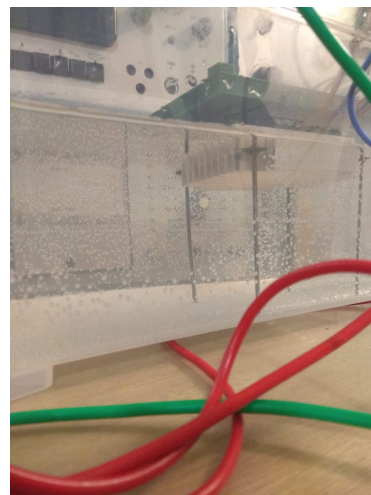


Obrázek 17: Sestavená kaskáda z článků

Pro lepší odvod tepla byl přípravek (obr. 13). Chladič byl svými žebry ponořen do vody. Tím se dosáhlo lepší "akumulace", tedy teplota horké strany nerostla příliš rychle. Celý přípravek je zobrazen na obr. 18.



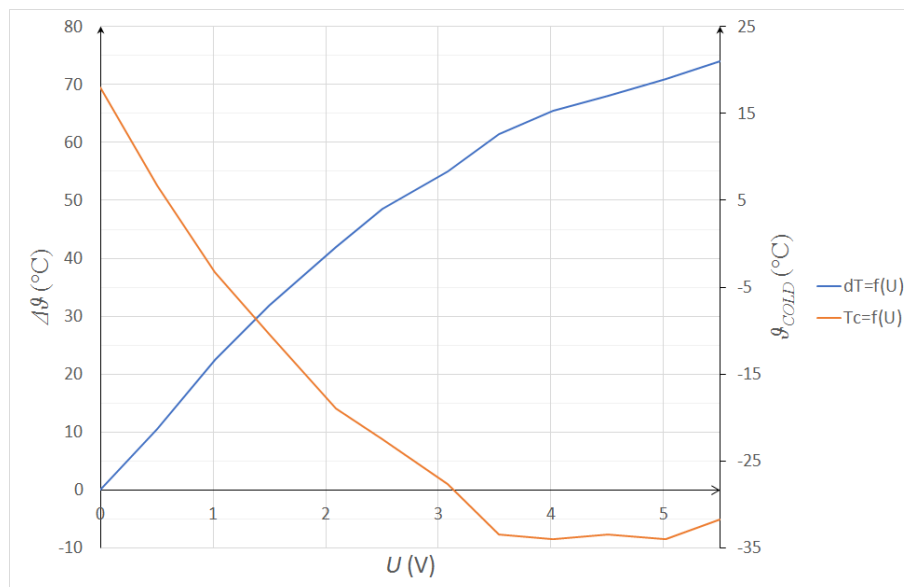
(a) Celý systém



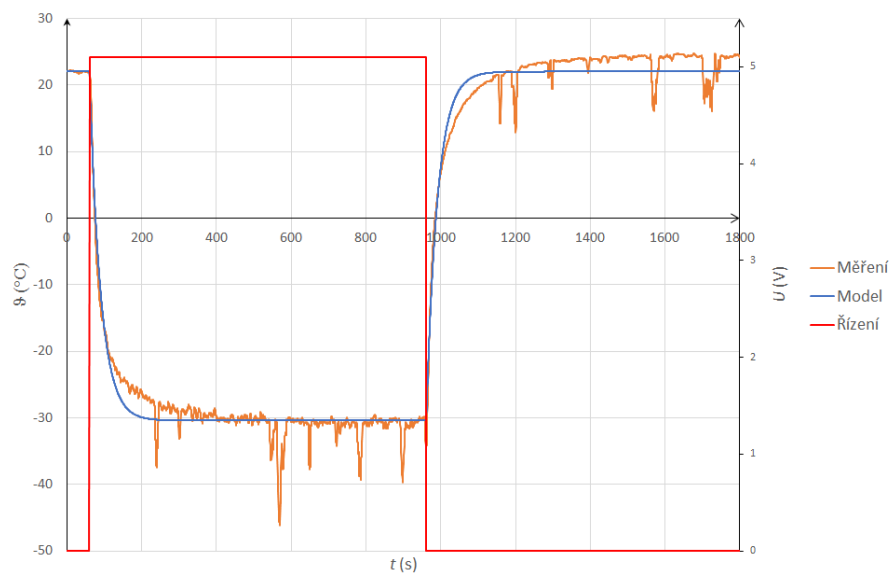
(b) Detail

Obrázek 18: Upravený přípravek pro měření TEC článků

Byla změřena charakteristika – převodní (závislost teploty studené strany na napájecím napětí), tato charakteristika je zobrazena na obr. 19a. Dále byla změřena přechodová charakteristika (obr. 19b).



(a) Převodní



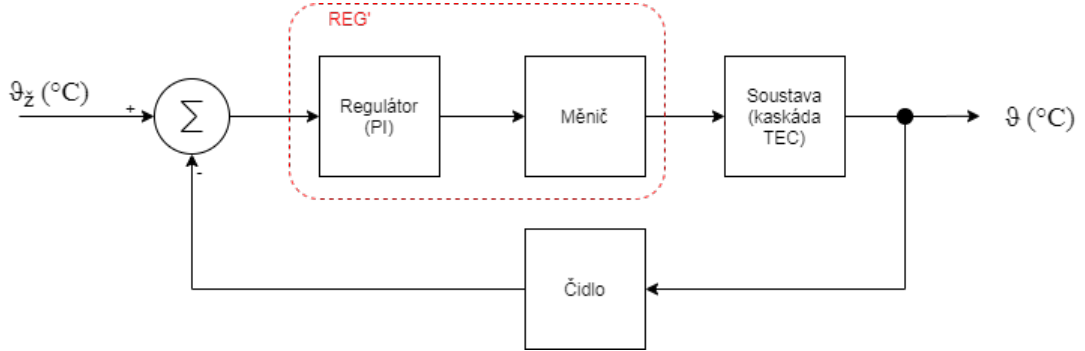
(b) Přechodová

Obrázek 19: Charakteristiky kaskády TEC článků

Na základě přechodové charakteristiky (obr. 19b) byla vytvořen model s přenosem:

$$P1_{kas} = \frac{K_P}{1 + \tau p} = \frac{-10,429}{1 + 30,025p}. \quad (24)$$

4.1 Návrh regulátoru



Obrázek 20: Schéma regulační smyčky

Z obr. 20 je patrné složení. Každý blok má svůj přenos. Všechny přenosy, kromě regulátoru, jsou aperiodické články prvního řádu popsané rovnicí 16. Soustava je popsána rovnicí 24. Přenos čidla je dán rovnicí:

$$P_{\text{čidlo}} = \frac{K_{P\check{C}}}{1 + \tau_{\check{C}}p}. \quad (25)$$

Pulzní měnič má přenos dán rovnicí:

$$P_{PM} = \frac{K_{PM}}{1 + \tau_{PM}p} = \frac{K_{PM}}{1 + \frac{1}{2f_{sw}}p}. \quad (26)$$

Měnič může být zařazen do přenosu regulátoru, na obr. 20 vyznačen červeně. Nebo může být zařazen k soustavě. Existuje několik druhů regulátorů s různými přenosy (rovnice 27, 28, 29 a 30). Existuje několik způsobů optimalizace a určení parametrů regulátoru. Nejznámější jsou metoda optimálního modulu a metoda symetrického optima.

P regulátor (proporcionální člen)

$$P_P = K_P \quad (27)$$

Nejjednodušší regulátor; nenulová regulační odchylka.

PD regulátor (proporcionálně derivační člen)

$$P_{PD} = K_P + K_D p = K_{PD} (1 + \tau_{DP} p) \quad (28)$$

Předstihový člen; nenulová regulační odchylka; dobré potlačení častých poruch.

PI regulátor (proporcionálně integrační člen)

$$P_{PI} = K_P + K_I \frac{1}{p} = K_{PI} \frac{1 + \tau_{PI} p}{\tau_{PI} p} \quad (29)$$

Odstraňuje regulační odchylku; dobré potlačení nárazových poruch.

PID regulátor (proporcionálně integračně derivační člen)

$$P_{PID} = K_P + K_I \frac{1}{p} + K_D p = K_{PID} \frac{(1 + \tau_I p)(1 + \tau_D p)}{\tau_I p} \quad (30)$$

Odstraňuje regulační odchylku; dobré potlačení častých poruch.

4.1.1 Návrh regulátoru metodou optimálního modulu

Zprv je třeba zjednodušit přenos. Ze soustav měnič-kaskáda-čidlo je třeba složit jednu soustavu, danou následujícím vztahem:

$$P_C = P_{PM} \cdot P_{1kas} \cdot P_{čidlo} = \frac{K_{PM} K_P K_{PČ}}{\left(1 + \frac{1}{2f_{SW}} p\right) (1 + \tau p) (1 + \tau_{Č} p)}. \quad (31)$$

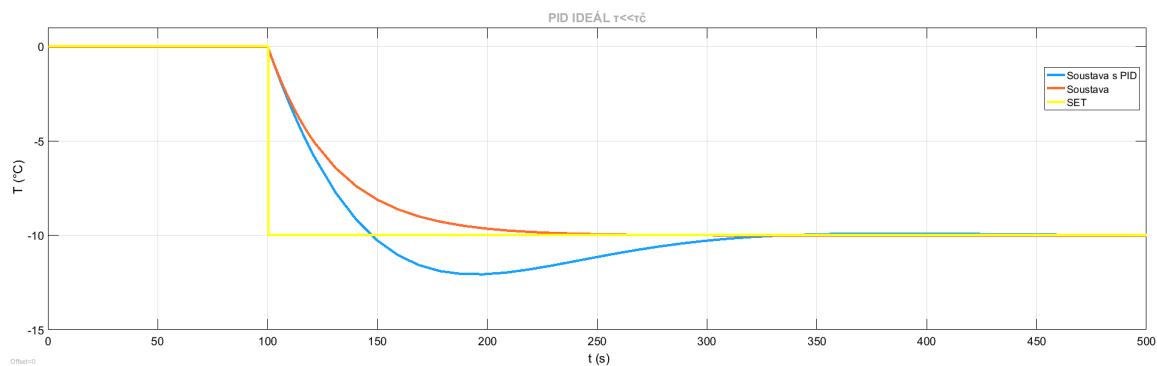
Protože se předpokládá použití regulátoru s integračním členem, lze vztah 31 zjednodušit.

$$P_C = \frac{K_{PM} K_P K_{PČ}}{\left[1 + p \left(\frac{1}{2f_{SW}} + \tau_{Č}\right)\right] (1 + \tau p)} \quad (32)$$

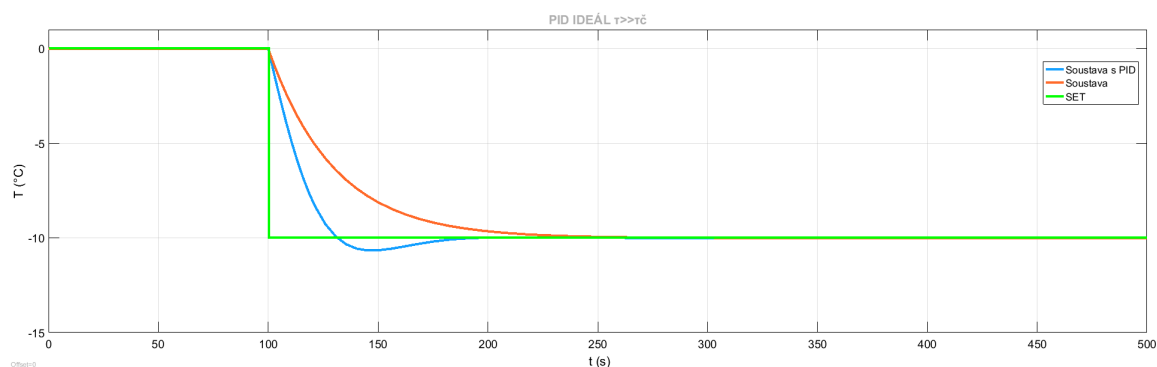
Mohou nastat tři situace:

- $\tau \ll \left(\frac{1}{2f_{SW}} + \tau_{Č}\right)$,
 - PI kompenzuje $\left(\frac{1}{2f_{SW}} + \tau_{Č}\right)$
 - $K_{PI} = \frac{\left(\frac{1}{2f_{SW}} + \tau_{Č}\right)}{2 \cdot K_{PM} K_P K_{PČ} \cdot \tau}$
 - $\tau_{PI} = \left(\frac{1}{2f_{SW}} + \tau_{Č}\right)$
- $\tau \gg \left(\frac{1}{2f_{SW}} + \tau_{Č}\right)$,
 - PI kompenzuje τ
 - $K_{PI} = \frac{\tau}{2 \cdot K_{PM} K_P K_{PČ} \cdot \left(\frac{1}{2f_{SW}} + \tau_{Č}\right)}$
 - $\tau_{PI} = \tau$
- $\tau \approx \tau_{Č} \gg \frac{1}{2f_{SW}}$.
 - PID kompenzuje $\tau \wedge \tau_{Č}$
 - $K_{PID} = \frac{\tau}{2 \cdot K_{PM} K_P K_{PČ} \cdot \frac{1}{2f_{SW}}}$
 - $\tau_I = \tau$
 - $\tau_D = \tau_{Č}$

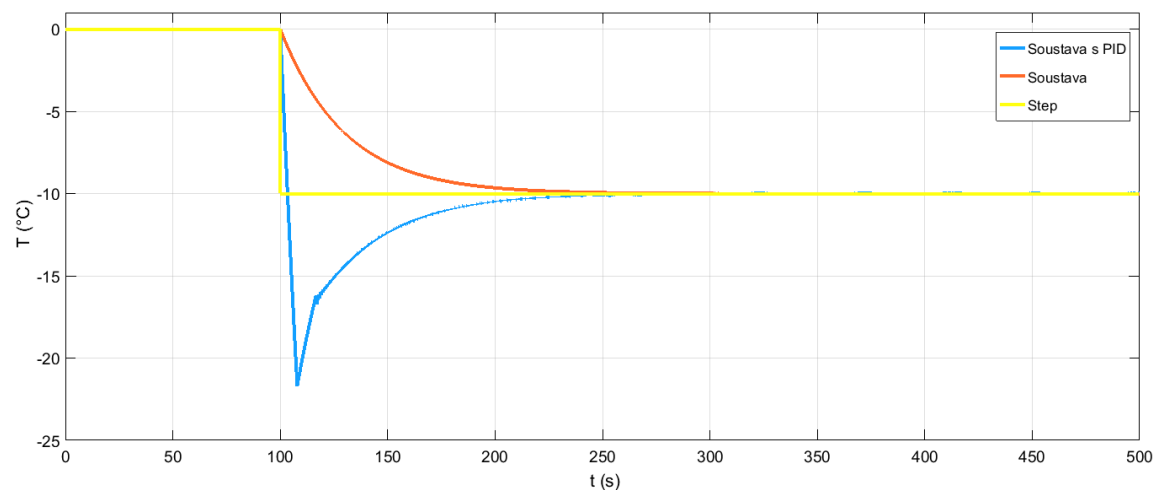
Na obr. 21 jsou zobrazeny průběhy ze simulace regulátoru s nastavenými konstantami podle uvedených vzorců. Stav $\tau \ll \tau_{\zeta}$ odpovídají průběhy na obr. 21a, pro stav $\tau \gg \tau_{\zeta}$ odpovídá obr. 21b a poslednímu stavu obr. 21c.



(a)



(b)



(c)

Obrázek 21: Simulace nastavení regulátoru

5 Realizace regulátoru

Pro realizaci regulátoru byl vybrán mikrokontrolér (dále MCU) ATmega16. Jedná se o 8 bitový mikrokontrolér založený na rozšířené architektuře AVR RISC. Atmega16 obsahuje:

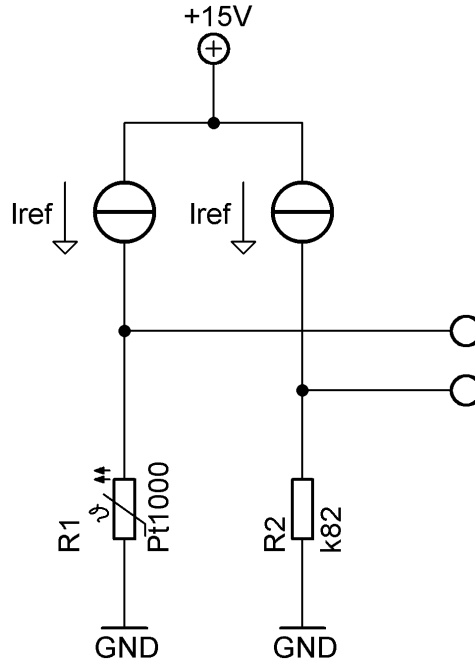
- 4 porty,
- Flash paměť o velikosti 16 KB,
- EEPROM o velikosti 512 B,
- čítače/časovače:
 - dva osmi bitové,
 - jeden šesnáci bitový,
 - 4 PWM kanály,
- deseti bitový A/D převodník, analogové komparátory,
- a jednotky:
 - USART,
 - TWI,
 - SPI,
 - WDT⁸,
 - zabudovaný RC oscilátor

Více informací je dostupné v [15] nebo [16].

5.1 Převodník odpor-napětí

Aby bylo možné připojit k MCU čidla Pt1000, bylo třeba vytvořit R-U převodník, pro použití dvou čidel Pt1000 a optimalizovat počet součástek. Pro maximální využití A/D převodníku, bylo třeba R-U převodník navrhnout tak, aby výstupní napětí bylo v rozsahu $0 - U_{ref}$. Byl vybrán tzv. proudový můstek (viz [3]), tím se minimalizuje nelinearita můstku. Zapojení můstku je na obr. 22. Rezistorem R2 se volí minimální měřená teplota.

⁸Watch-Dog Timer



Obrázek 22: Schéma měřicího můstku s proudovými zdroji

Pro výstupní napětí platí následující vztah (za předpokladu platnosti rovnice 6):

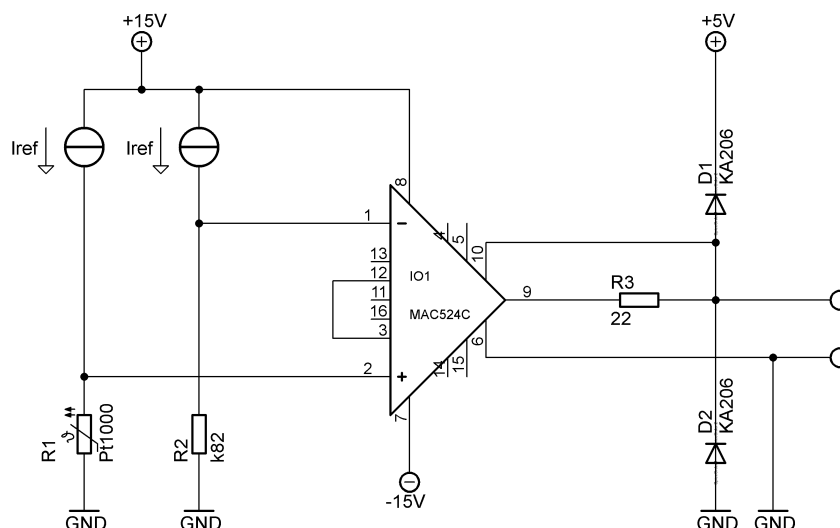
$$U = I_{ref} R_0 \alpha \cdot \vartheta + I_{ref} (R_0 - R_{min}). \quad (33)$$

Protože výrobce čidla doporučuje měřící proud menší jak 0,5 mA, aby nedošlo k samoohřevu, byl zvolen měřící proud 100 μ A. Pak po dosazení do rovnice 33:

$$U = 3,85 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta + 0,01797. \quad (34)$$

Jinými slovy při změně teploty o 1 $^{\circ}$ C se výstupní napětí změní cca o 0,4 mV. A/D převodník při $U_{ref} = 5$ V má rozlišovací schopnost cca 5 mV, tedy změna teploty se neprojeví. Proto je třeba napětí zesílit vhodným zesilovačem. Byl vybrán přístrojový zesilovač MAC524C (ekvivalent AD524). Vstupní odpor zesilovače je $10^9 \Omega$ (více v [17] str. 103 a [18]), čímž je můstek nezatížený, je eliminována přídavná nelinearita převodu. Zesílení je nastaveno pomocí vnitřního rezistoru na 40 dB (s přesností pod 0,50 %). Schéma je na obr. 23. Pro výstupní napětí platí následující vztah.

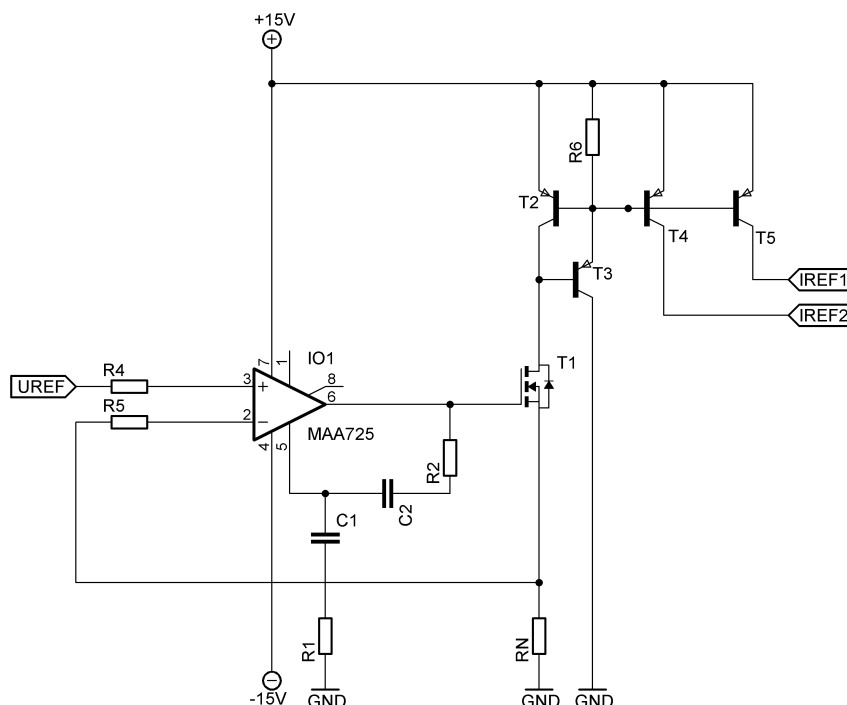
$$U_o = A_U [I_{ref} R_0 \alpha \cdot \vartheta + I_{ref} (R_0 - R_{min})] = 3,85 \cdot 10^{-2} \cdot \vartheta + 1,797 \quad (35)$$



Obrázek 23: Schéma měřicího můstku se zesilovačem, bez kompenzačních obvodů

5.1.1 Zdroj konstantního proudu

Je nutné zajistit konstantní proud, který napájí jednotlivé části můstku. Dále je nutná stejná velikost proudů v jednotlivých větvích mostu. Pokud by bylo použito jedno čidlo stačilo by použít integrovaný obvod REF200, podobně jako v kapitole 3.2.2. Počet připojených čidel je větší, proto by i cena celého zařízení velmi rostla. Proto bylo zvoleno stavby vlastního zdroje proudu s použitím proudových zrcadel s PNP tranzistory. Celé schéma je na obr. 24.



Obrázek 24: Schéma zapojení zdroje proudu

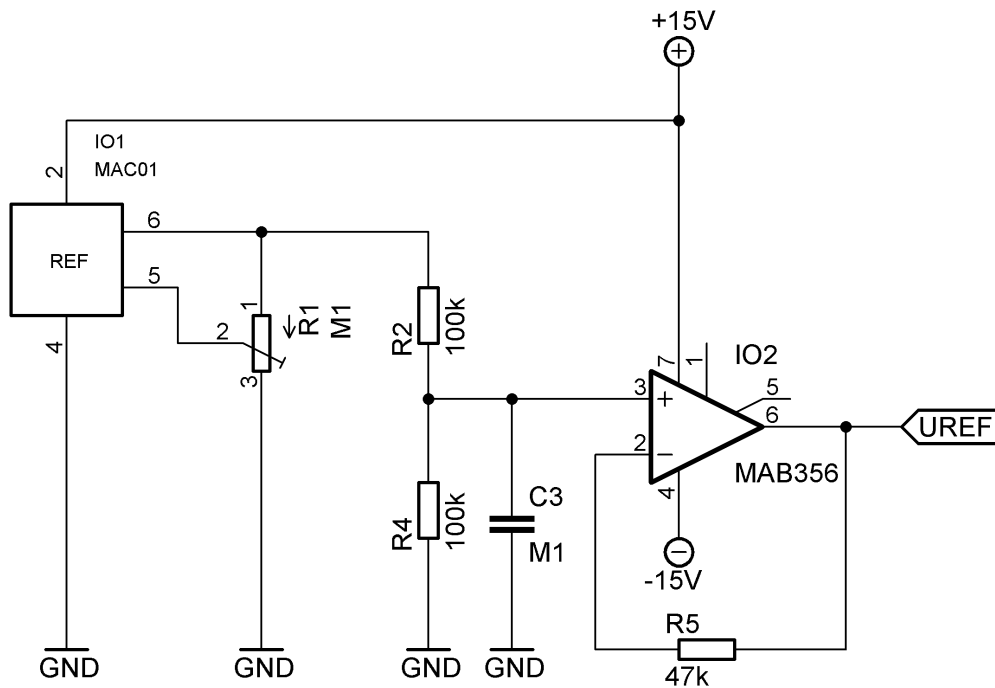
Celé zapojení se skládá ze dvou hlavních částí. Jedna je proudový zdroj s operačním zesilovačem (konkrétně MAA725⁹) a MOS tranzistorem. Druhá část je proudové zrcadlo s PNP tranzistorem. První část nastavuje pracovní proud, pro který platí vztah 36. Druhá část zajišťuje, že proud I_{REF1} je shodný s proudem I_{REF2} a také s proudem proudového zdroje.

$$I_{SET} = \frac{U_{REF}}{R_N} \quad (36)$$

Pokud je třeba zvětšit počet proudů, stačí přidat odpovídající počet PNP tranzistorů do proudového zrcadla. Je vhodné tranzistory vybrat s podobnými parametry pro minimalizaci odchylky proudů.

5.1.2 Napěťová reference

Poslední částí celého převodníku R-U je zdroj referenčního napětí. Jeho schéma je na obr. 25. Základem je integrovaný obvod MAC01 (ekvivalent REF01), který slouží jako zdroj přesného referenčního napětí +10 V. Protože referenční napětí bude použito i pro A/D převodník, je třeba jeho velikost upravit na +5,0 V. Toho je dosaženo pomocí odporového děliče doplněného o sledovač napětí s OZ (konkrétně MAB356¹⁰).



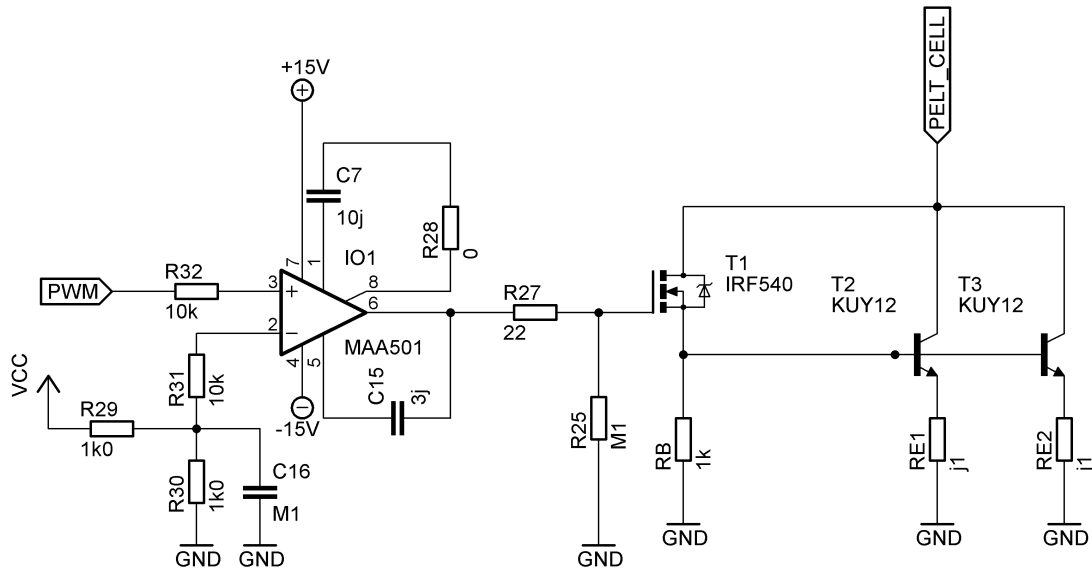
Obrázek 25: Schéma zapojení zdroje referenčního napětí +5,0 V

⁹Bližší informace [19] str. 41

¹⁰Bližší informace [19] str. 121

5.2 Spínací tranzistor a budič

Jako spínací tranzistor byl vybrán NPN tranzistor KUY12. Protože v katalogu [20] je uveden maximální proud tranzistoru 10 A, bylo pro testy zvoleno paralelní spojení dvou tranzistorů. Protože teplotní součinitel odporu bipolárních tranzistorů je záporný, je do emitorů zařazen vyrovnávací rezistory 0,1 Ω . Budicí obvod tvoří komparátor z operačního zesilovače MAA501¹¹. Tento komparátor budí MOS tranzistor, který následně spíná NPN tranzistory. Schéma je zobrazeno na obr. 26.

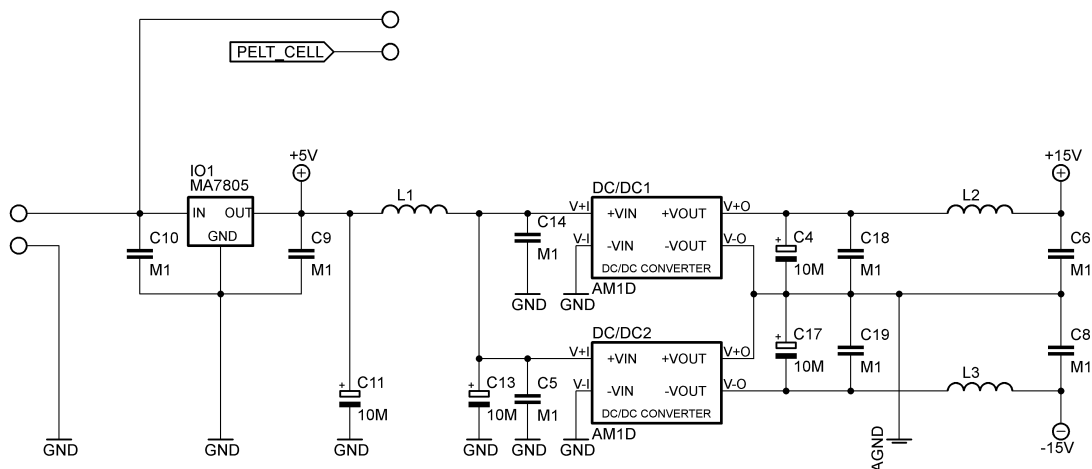


Obrázek 26: Schéma zapojení elektronického spínače

Jak je z obr. 26 patrné jedná se o tzv. spodní spínač. Tento druh spínače byl zvolen z důvodu jednoduchosti budiče.

¹¹Bližší informace [19] str. 5

5.3 Ostatní pomocné obvody analogové části



Obrázek 27: Schéma zapojení zdrojové části

Zdrojová část na obr. 27 se skládá ze zdroje +5 V s monolitický stabilizátor MA7805¹², další částí je zdroj ± 15 V, tvořený dvěma izolovanými DC/DC měniči AM1D-0515SH30Z¹³.

Celkové schéma je na obr. 35 a 36.

5.4 Číslicová část

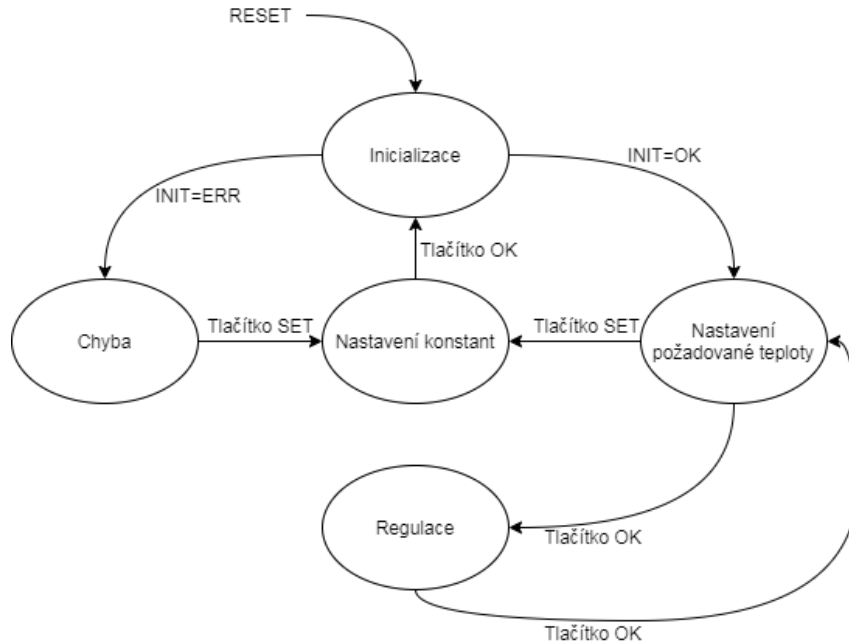
Jak již bylo zmíněno, základem je MCU Atmega16, který je doplněn o potřebné pomocné obvody. K MCU je připojen displej z kapalných krystalů (LCD 16x2). Dále jsou připojeny tlačítka pro obsluhu programu. Jsou vyvedeny komunikační piny pro TWI (I²C) a pro sériovou komunikaci (tzv. UART). Celkové schéma číslicové části je na obr. 37.

¹²Bližší informace [19] str. 199

¹³Bližší informace [21]

5.5 Program MCU

Program je koncipován jako tzv. stavový automat. Jeho funkci pěkně znázorňuje stavový diagram na obr. 28.



Obrázek 28: Stavový diagram

Po restartu MCU je nastaven stav inicializace. Pokud v inicializaci nastane chyba je vyvolán chybový stav. Pokud inicializace proběhne v pořádku, následuje stav nastavení žádané teploty, po nastavení teploty a stisku potvrzovacího tlačítka se stav změní na stav regulace. Při opětovném stisku potvrzovacího tlačítka se stav přepne na nastavení žádané teploty. V tomto stavu je možné podobně jako u chybového stavu stiskem tlačítka nastavení se dostat do stavu, ve kterém se nastavují konstanty pro regulaci. Po nastavení a potvrzení se přepne stav na inicializaci.

Celé tělo stavového automatu je umístěno ve funkci MAIN. Jeho kódová implementace je zobrazena na výpisu 1.

```
int main(void){  
    /* Replace with your application code */  
    stav=INIT;  
    while (1) {  
        switch (stav){  
            case INIT:  
                init_routine();  
                break;  
            case SET_CONST:  
                set_const_routine();
```

```

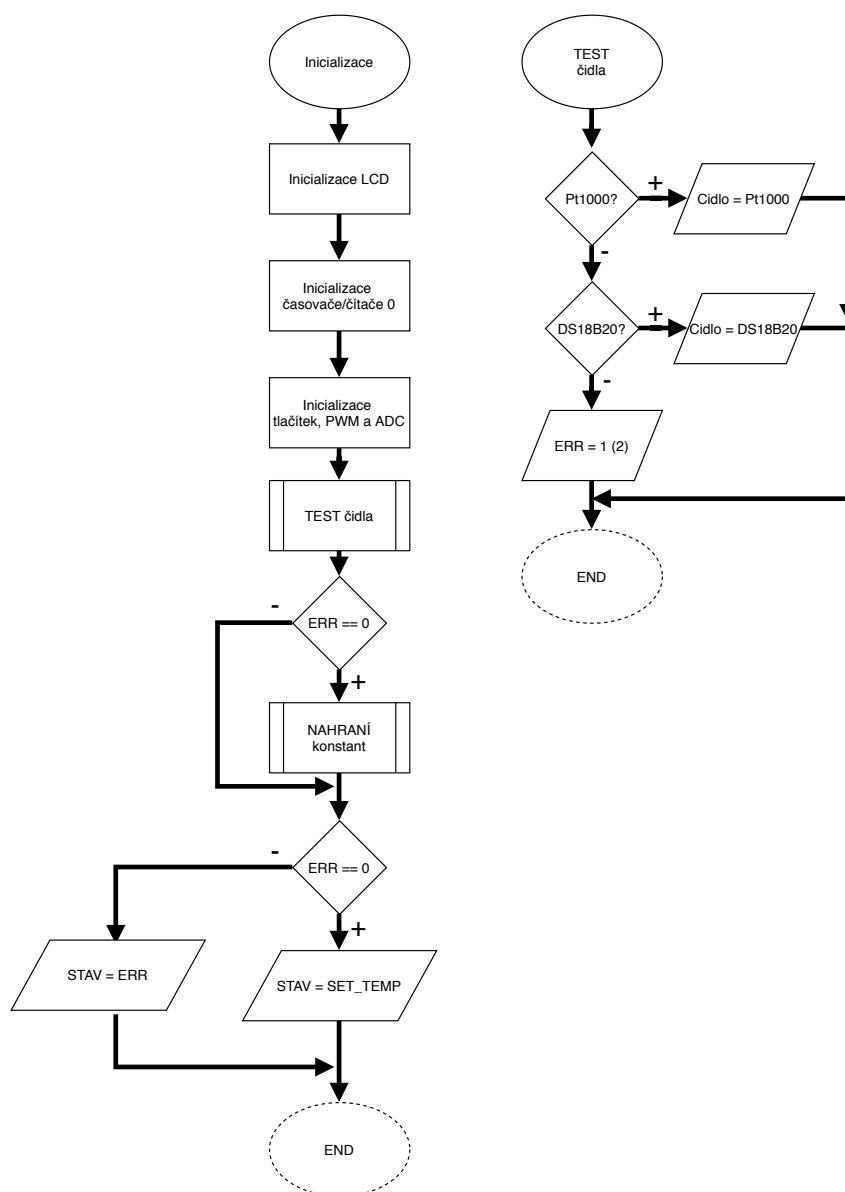
        break;
    case SET_TEMP:
        set_temp_routine();
        break;
    case REG:
        reg_routine();
        break;
    case ERR:
        err_routine();
        break;
    default:
        stav=INIT;
    }
}
return 0;
}

```

Výpis 1: Zdrojový kód metody MAIN

5.5.1 Inicializace

V první fázi inicializace se vyhledává senzor studené strany. V první fázi je testována přítomnost čidla Pt1000, je-li připojen je senzor nastaven na Pt1000, pokud není připojen probíhá hledání senzoru na sběrnici *One Wire*. Pokud je nalezeno více senzorů na sběrnici, je provedena identifikace senzoru. Pokud je identifikace úspěšná je senzor nastaven na DS18B20. V případě, že není nalezen ani jeden z typů senzoru, je vytvořena chyba č. 1. Po té se provádí test na přítomnost senzoru teplé strany. Postup je stejný jako u studené strany. Jen chyba má označení č. 2. Je tedy nutné, aby byla připojena obě čidla, pokud není třeba měřit horkou stranu, je možné připojit rezistor 1 k Ω na svorky pro čidlo Pt1000 horké strany. Pokud vše proběhlo bez chyby, může následovat další fáze. To je kontrola uložených konstant. Tento test může vyhodit chyby č.4 a 5. Poslední částí je výpočet konstant pro regulátor. Poté probíhá přepnutí stavu. Na obr. 29 je znázorněn zjednodušený vývojový diagram inicializace.



Obrázek 29: Vývojový diagram inicializace

5.5.2 Nastavení žádané teploty

Nastavení teploty je jednoduché. Pomocí tlačítek se mění hodnota, jedno tlačítko inkrementuje hodnotu druhé dekrementuje. Pokud je nastavena žádaná hodnota musí se potvrdit stiskem potvrzovacího tlačítka. Také v tomto stavu je možné přepnout stav na změnu konstant pro regulaci (zesílení, časové konstanty). Po potvrzení žádané teploty se stav přepne do regulace.

5.5.3 REGULACE

Regulace probíhá na základě vzorce 37. Jedná se o aplikaci PSD regulátoru.

$$A[k] = P \cdot e[k] + I \cdot \sum_{i=0}^{k-1} e[i] + D \cdot (e[k] - e[k-1]) \quad (37)$$

Parametry P , I , D jsou odvozeny z rovnice 30 :

$$P = K_{PID} \cdot \frac{\tau_I + \tau_D}{\tau_I}, \quad (38)$$

$$I = \frac{K_{PID}}{\tau_I} \cdot T_{VZ}, \quad (39)$$

$$D = K_{PID} \cdot \tau_D \cdot \frac{1}{T_{VZ}}. \quad (40)$$

Implementace je zobrazena na uveden ve výpisu 2. Během testování se ukázal problém s optimalizací, překladač vymazal jednoduchou sumaci, proto je řešení takové jaké je. Jsou použity proměnné typu *double* , sice MCU je celočíselný, a toto je SW nadstavba, která je pomalá. Důvod použití je zvětšení přesnosti a zjednodušení oproti normování. Vzorkovací frekvence je 1 Hz, proto čas výpočtu není kritický. Tento čas byl zvolen z důvodů možnosti použití DS18B20.

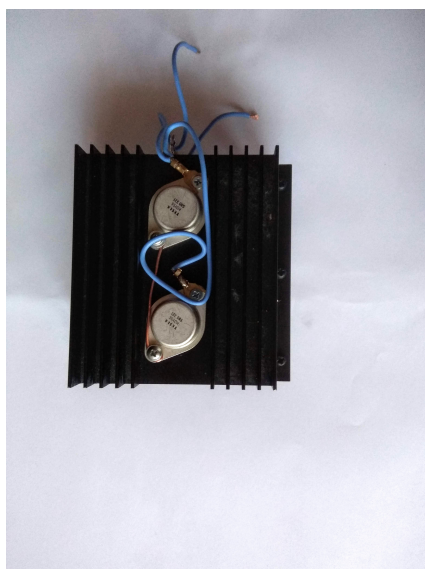
```
void reg_routine (void){
    unsigned int pomoc=0;
    int duty;
    uint8_t i;
    double temp;
    double az=0;
    char text[32];
    reg_e[1] = 0.0;
    if (stav_old != REG){ //prvotni ini
        GICR |= (1 << INTO);
        lcd_clrscr();
        lcd_gotoxy(0,0);
        sprintf(text,"Regulator: S=%d",(int)reg_hz);
        lcd_puts(text);
        reg_a_time= reg_h_time = 0; //vynulovani casovace
    }
    if (pocitadlo_lcd % 100 == 0){ //promazani radku LCD
        lcd_gotoxy(0,1);
        lcd_puts("          ");
    }
}
```

```

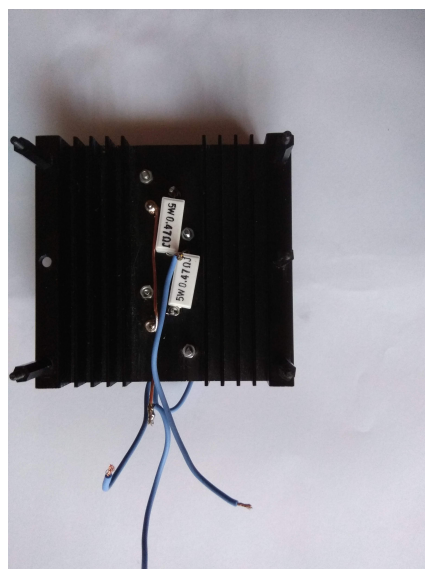
if(reg_a_time >= T_VZ){ //po uplynuti vzorkovaci doby se spusti
    pocitadlo_lcd++;
    reg_a_time= reg_h_time = 0; //vynulovani pocitadel
    if(cold == PT1000){ //pokud je pripojeno Pt1000
        pole_filtr_temp[pocitadlo_filt]=read_ADC(COLD_SIDE_PT1k);
        pocitadlo_filt++;
        if (pocitadlo_filt >= N_FILT)
            pocitadlo_filt = 0;
        for (i = 0;i<N_FILT;i++){
            pomoc += pole_filtr_temp[i];
        }
        temp = N2T(pomoc/N_FILT); //filtrace
    } else { //nebo DS - zatim neimplementovano
        temp = 0.0; //zatim test
    }
    reg_e[1] = reg_hz-temp; //vypocet e
    az = (double)sum*(double)reg_I+reg_P*reg_e[1]+ reg_D*(reg_e[1]-reg_e[0]);
        //vypocet A
    duty = (int)az; //pretyp z double na int
    if (duty > MAX){ //meze
        duty = MAX;
    }else if (duty < MIN){
        duty = MIN;
    }
    reg_e[0] = reg_e[1]; //ulozeni vzorku
    sprintf(text,"M:%d;=%d(%d)",(int)temp,duty,(int)sum); //vypis
    lcd_gotoxy(0,1);
    lcd_puts(text);
    PWM(duty); //akcni zasah
}
stav_old = stav;
sum += reg_e[1]; //sumace
}

```

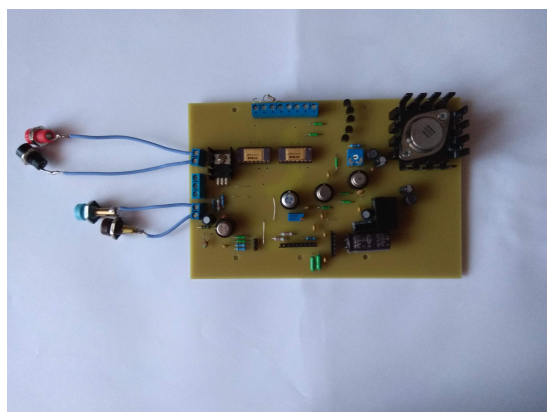
Výpis 2: Zdrojový kód metody regulace



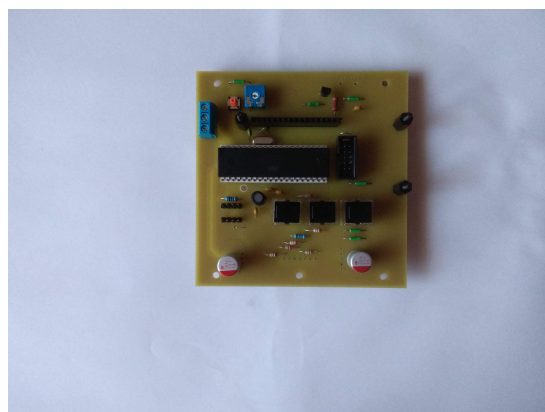
(a) Chladič se spínacími tranzistory



(b) Záběr na emitorové rezistory



(c) Analogová část



(d) Digitální část



(e) Digitální část s LCD

Obrázek 30: Části regulátoru

6 Verifikace regulátoru

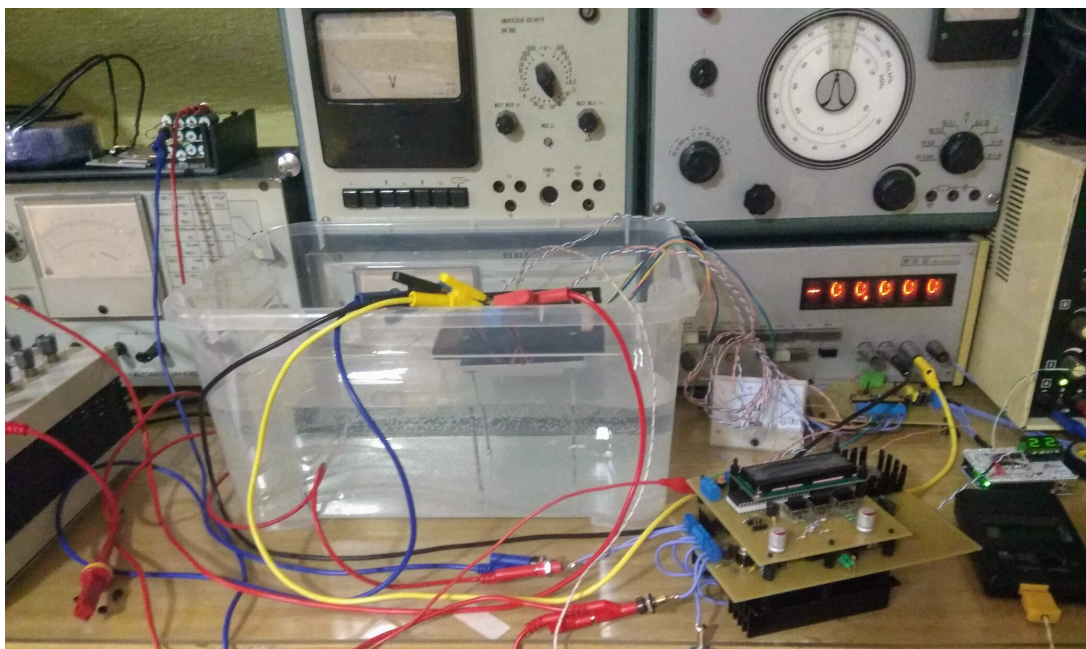
Za účelem kontroly chování regulátoru byl upraven přípravek. Konkrétně dno, tak aby bylo možné umístění tří čidel. Je osazen dvěma Pt1000 a termočlánkem typu K. K regulátoru není připojen senzor teplé strany, je nahrazen rezistorem 1k0, je připojen pouze senzor studené strany Pt1000. Teplá strana je monitorována přípravkem a aplikací v LabVIEW, podobně jako při měření charakteristik jednotlivých článků (viz kap. 3.2). K tomuto přípravku je připojený druhý senzor na studené straně. Pro ověření je ještě umístěn teploměr s termočlánkem.

Regulátor je napájen ze zdroje, který je tvořen transformátorem, usměrňovačem a kapacitní baterií. Proto napájecí napětí obsahuje zvlnění.

6.1 Postup měření

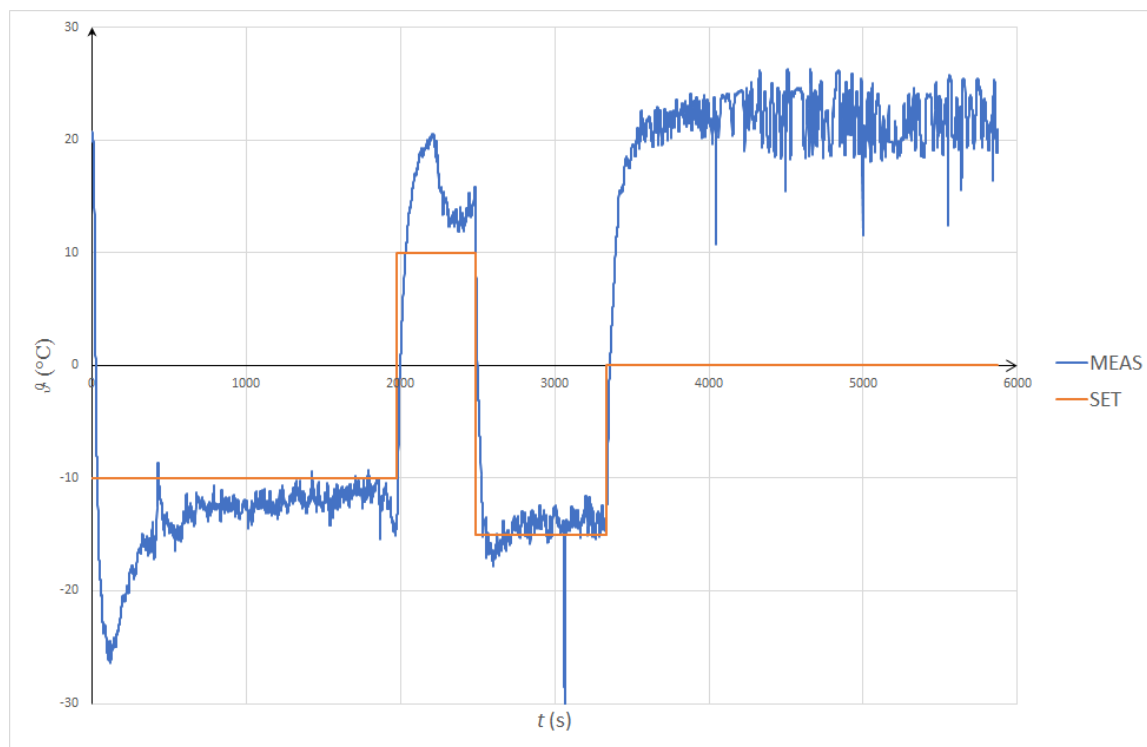
Měření spočívá v zadání požadované teploty $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, vyčkání a následné nastavení teploty $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, po ustálení nastavení nové teploty $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Aplikace v LabVIEW je nastavena na vzorkovací kmitočet 2 Hz.



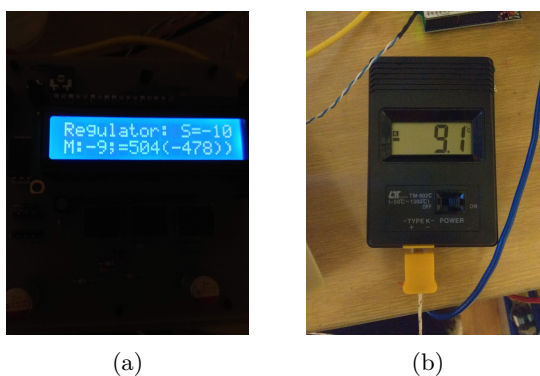
Obrázek 31: Ukázka měřícího stanoviště

6.2 Výsledky



Obrázek 32: Měření regulátoru

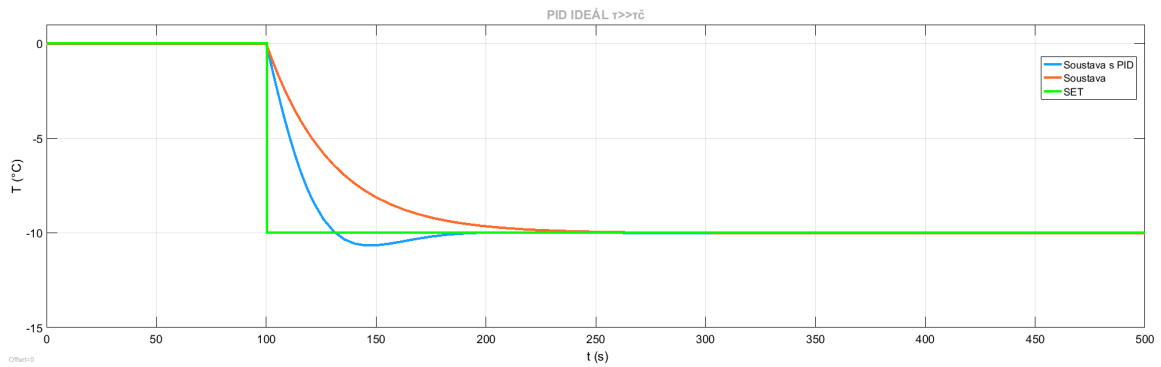
Z obr. 32 je patrné, že teplota není absolutně přesná, v teplotách nad bodem mrazu vody je regulátor úplně mimo. Je to způsobeno kontaktem senzoru se studenou stranou. Vlivem roztažnosti se senzor více přitlačí k ploše TEC článku. "Šum" z obrázku je způsoben špatným vedením k měřicí kartě a špatným rozlišením převodu. Na obr. 33 je zobrazeno porovnání teploty měřené regulátorem a teploty měřené teploměrem s termočlánkem.



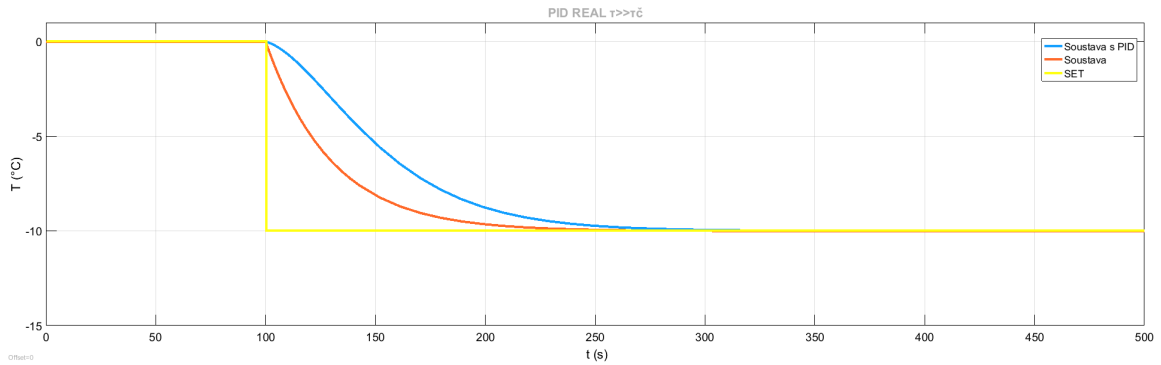
Obrázek 33: Porovnání teploměrů

Ukázalo se, že dynamika systému není taková, jako při výstupu ze simulací. Důvod byl odhalen brzy. Způsobuje to nerovnoměrný přenos měniče, způsobený především emitorovými rezistory, které způsobují chybový signál. Po přidání chybového členu do simulace má za následek, přiblížení simulovaných průběhů s měřeními¹⁴. Simulační schéma je uvedeno v příloze B. Za určitých předpokladů lze chybový člen zapsat:

$$ERR = I \cdot \frac{R_{E1}R_{E2}}{R_{E1} + R_{E2}} + U_{BE} = \frac{U_{OUT}}{R_{kas}} \cdot \frac{R_{E1}R_{E2}}{R_{E1} + R_{E2}} + U_{BE} = K \cdot U_{OUT} + Q. \quad (41)$$



(a) Bez chybového členu



(b) S chybovým členem

Obrázek 34: Porovnání simulací

¹⁴Překmit je způsoben opět přípravkem (jeho roztažností)

7 Závěr

V první části práce byla provedena analýza tří senzorů teploty. Výsledkem analýzy bylo určení přenosů a časových konstant. Časové konstanty byly získány z křivky ohřevu a chlazení. Je nutné podotknout, že chlazení probíhalo bez nuceného proudění, jak tomu bývá u normálních měření. Tím byl získán "nejhorší" stav. Výsledná časová konstanta je pak dána průměrem těchto dvou hodnot. Nejlepší odezvu měl termočlánek, následně Pt1000 a jako nejpomalejší byl senzor DS18B20 ve vodotěsném krytu. Dále bylo provedeno experimentální měření vlivu rušení z běžných zdrojů, zde se ukázala vyšší citlivost na rušení u termočlátku, ale nutno dodat, že bylo velmi obtížné najít alespoň nějaké rušení, které by bylo prokazatelné v datech. Jinými slovy imunita všech subjektů měření autora práce překvapila.

Dalé byla provedena analýza tří vybraných TEC článků. Byly sestaveny převodní charakteristiky, protože se běžně doporučuje proudové zdroje pro napájení, z převodních charakteristik vyplývá jednoznačně, že není rozdíl mezi napětovým a proudovým napájením. Dále byla určena časová konstanta přestupu tepla z teplé strany na studenou. Tato konstanta se pohybovala kolem 30 s u velkých článků a kolem 50 s u malých. Proto je vhodné použití PWM s nosným kmitočtem alespoň v řádech stovek Hz.

V další části práce byla sestavena kaskáda TEC článků. Bylo opět provedeno měření převodní charakteristiky, určení přenosu a časové konstanty. Vše sloužilo k možnosti návrhu regulátoru. Během měření se ukázal problém s odvodem tepla z teplé strany, autor proto zvolil simulaci vodního chlazení v domácím prostředí. Ukázalo se, že teplotní rozdíl roste lineárně s napětím, ale zdůvodňů konečné rychlosti přestupu tepla, tepelným odporům a jiným ztrátám, se teplota studené strany při určité teplotě satureovala. Bylo dosaženo teploty nižší než $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, tato teplota byla změřena třemi nezávislými teploměry. Následovalo vytvoření regulátoru, největší částí bylo vytvoření elektroniky.

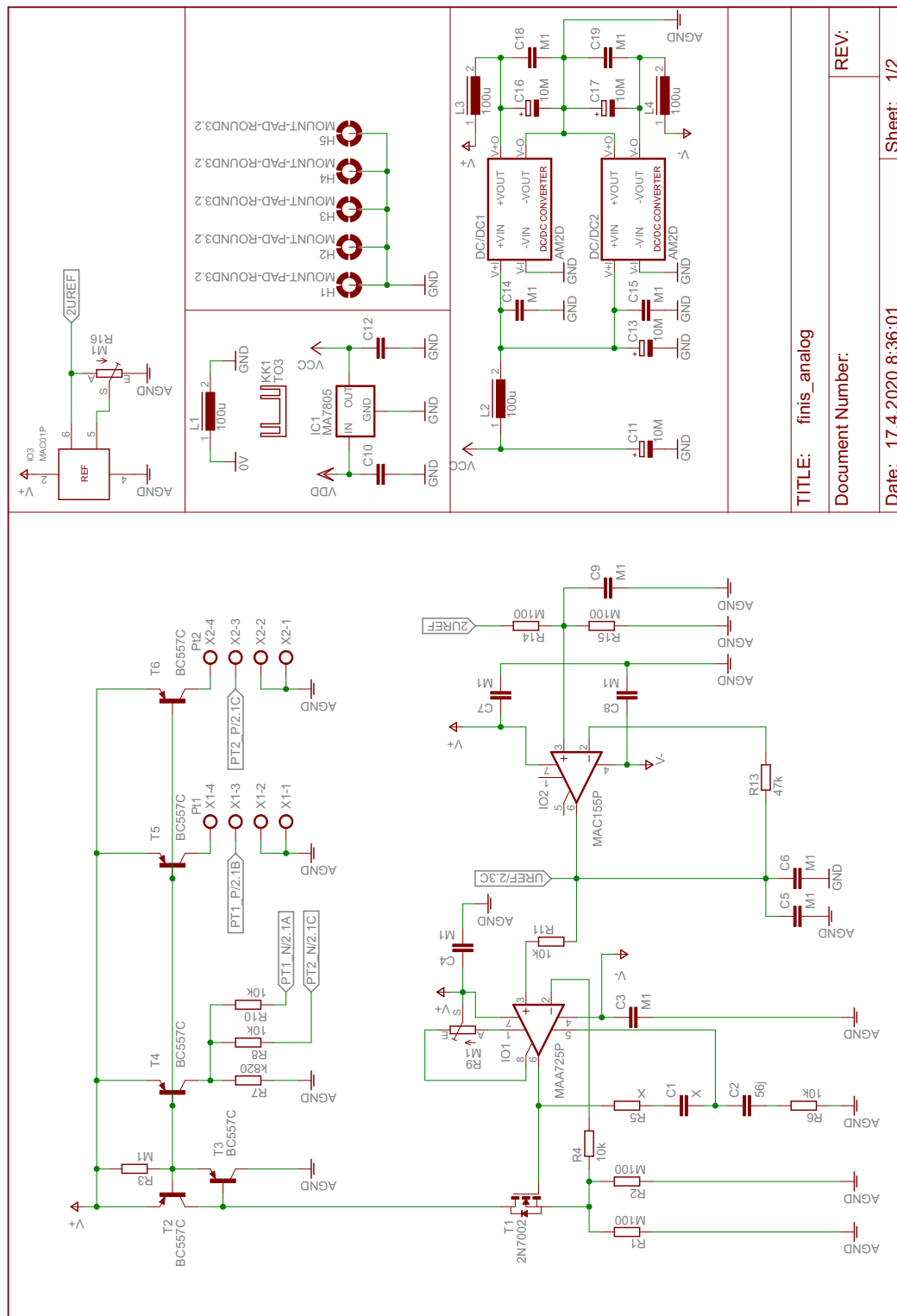
Vytvořený regulátor byl následně testován a srovnáván s výstupy ze simulace. Ukázalo se několik rozdílů, první a největší byl v chybovém členu výstupního napětí z měniče. Po zavedení chybového členu do simulace se průběhy shodovaly více. Další problém, byl v přípravku, zdůvodňů vůle materiálů fungoval regulátor velmi dobře v nízkých teplotách, v teplotách nad bodem tuhnutí vody byly odchylky značné. Další problém spočíval ve zvolené koncepci analogové elektroniky, proudový zdroj nefungoval ideálně, před měření bylo třeba zkontrolovat nastavení proudu, proto by byla lepší jiná koncepce s obvodem REF200 a třemi zesilovači MAC524.

Použitá literatura a reference

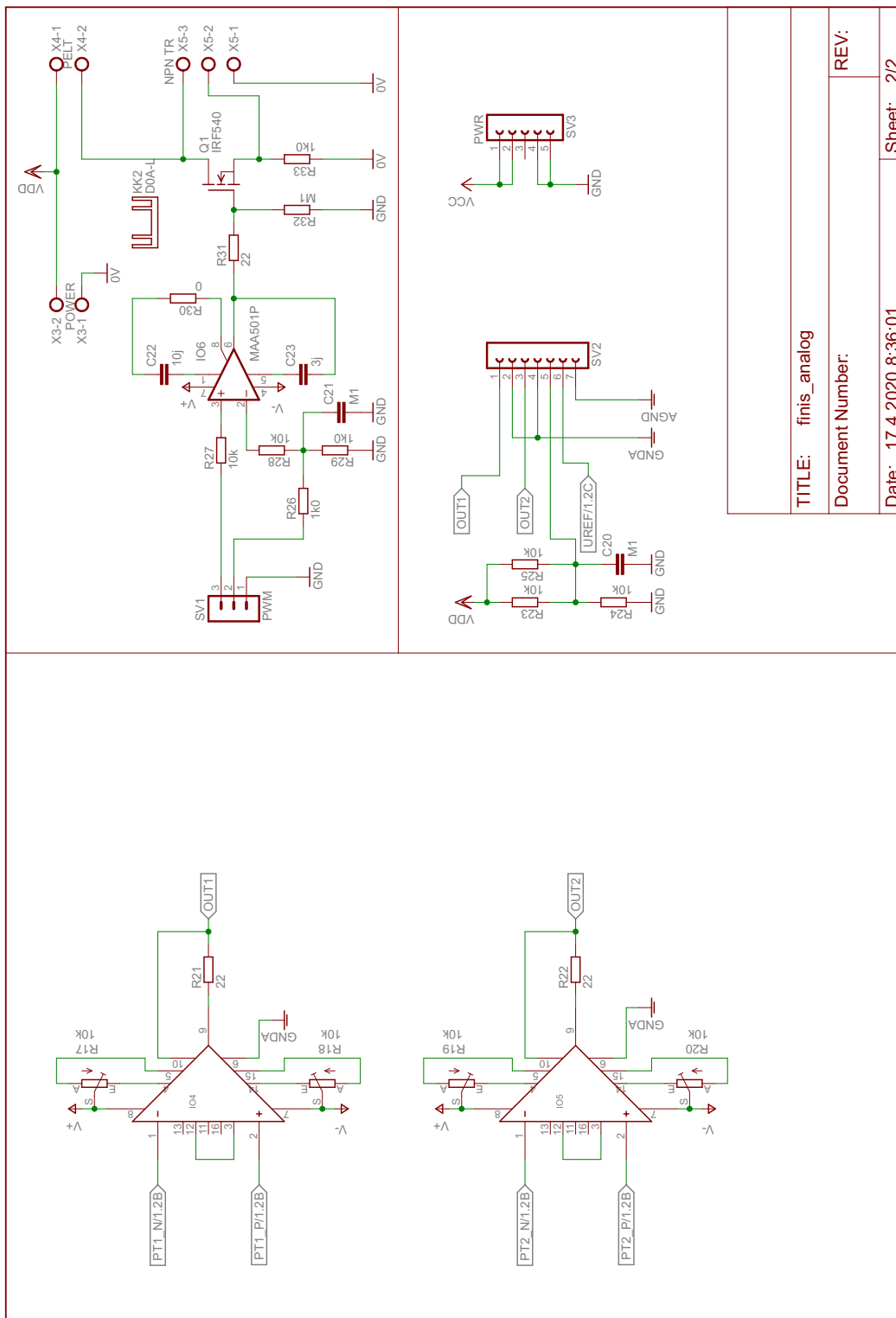
1. TARÁBEK, Pavol; ČERVINKOVÁ, Petra. *Odmaturuj! z fyziky*. Vyd. 2. Brno: Didaktis, 2006. ISBN 80-735-8058-6.
2. ČECH, Bohumír; KADLEC, Zdeněk. *Měření teplot v energetice*. První. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1861-0.
3. KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. První. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0145-4.
4. RIPKA, Pavel. *Senzory a převodníky*. První. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3123-3.
5. ČSN EN 60751. *Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 20 s. Třídící znak: 25 8340.
6. *Seebeckův jev* [online] [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>.
7. KREIDL, Marcel. *Technická měření*. Třetí. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1978.
8. *DS18B20: datasheet* [online]. San Jose: Maxim Integrated, 2007 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
9. *FAQ's & Technical Information* [online]. Traverse City: TE Technology, 1989 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://totech.com/faqs/>.
10. *Compendium* [online]. Rubigen: Meerstetter Engineering, 2012 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.meerstetter.ch/customer-center/compendium/>.
11. HASSDENTEUFEL, Prof. Ing. Josef; KVĚT, Ing. Karel; KOLEKTIV. *Elektrotechnické materiály: Základní spis ČMT*. První. Praha: SNTL, 1967.
12. *Thermoelectric (Peltier) coolers* [online]. Saint-Petersburg: KRYOTHERM, 1992 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <http://kryothermtec.com/thermoelectric-coolers.html>.
13. *TEC Microsystems* [online]. Berlin: TEC Microsystems, 2020 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.tec-microsystems.com/index.html>.
14. ŠOTOLA, Vojtěch. *Systém napájení měřících přístrojů z okolního prostředí: Energy Harvesting*. Ostrava, 2018. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
15. MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMEL ATmega16: 4. díl*. První. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0174-8.
16. *ATmega16: datasheet* [online]. San Jose: Atmel, 2010 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/doc2466.pdf>.

17. BIČÍK, Ing. Ivan; KOLEKTIV. *Katalog elektronických součástek, konstrukčních dílů, bloků a přístrojů*. První. Brno: TESLA ELTOS n.p., 1989.
18. *AD524: datasheet* [online]. Norwood: Analog Devices, 2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD524.pdf>.
19. *Analogové integrované obvody: pro všeobecné použití*. První. Rožnov pod Radhoštěm: TESLA - Elektronické součástky, 1987.
20. *Křemíkové výkonové tranzistory*. První. Rožnov pod Radhoštěm: TESLA Rožnov, 1986.
21. *AM1D-Z: datasheet* [online]. Quebec: Aimtec, 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://www.aimtec.com/site/Aimtec/files/Datasheet/HighResolution/AM1D-Z.pdf>.

A Schémata

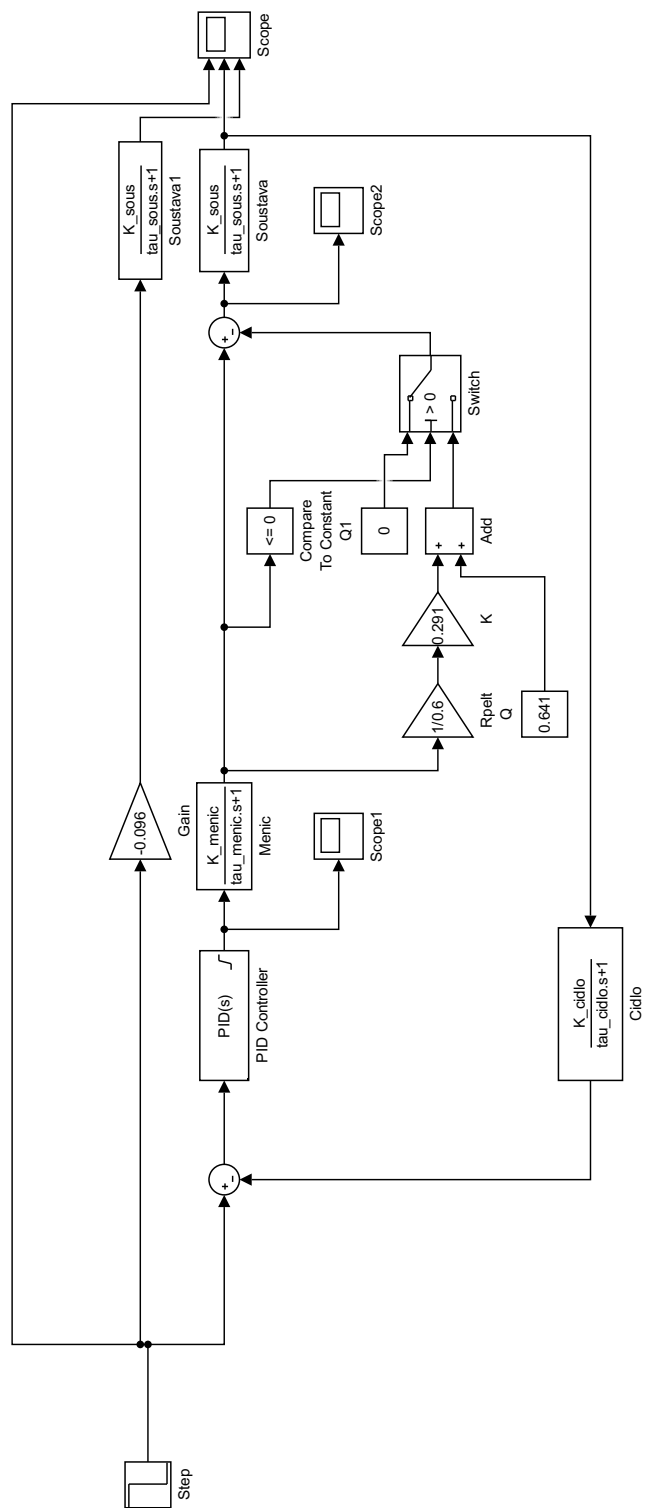


Obrázek 35: Schéma analogové části č. 1



Obrázek 36: Schéma analogové části č. 2

B Simulační schéma



Obrázek 38: Simulační schéma